

LANGATON KIINTEISTÖN KUNNONVALVOTAJÄRJESTELMÄ

Jaakko Miekkavaara

Opinnäytetyö
Lokakuu 2012

Tietotekniikan koulutusohjelma
Tekniikan ja liikenteen ala



JYVÄSKYLÄN AMMATTIKORKEAKOULU
JAMK UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES



Tekijä(t) MIEKKAVAARA, Jaakko	Julkaisun laji Opinnäytetyö	Päivämäärä 12.10.2012
	Sivumäärä	Julkaisun kieli Suomi
	Luottamuksellisuus () saakka	Verkojulkaisulupa myönnetty (X)
Työn nimi LANGATON KIIINTEISTÖN KUNNONVALVONTAJÄRJESTELMÄ		
Koulutusohjelma Tietotekniikan ko.		
Työn ohjaaja(t) KOTKANSALO, Jouko		
Toimeksiantaja(t) Lamit Oy		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Työssä suunniteltiin ja toteutettiin anturiyksiköt (HW ja SW) sekä anturiyksiköiltä tiedot keräävä ja välittävä loggerilaitte (HW). Loggerilaitteen SW oli tarkoitus toteuttaa osana toista opinnäytetyötä. Tavoitteena oli saada laitteistosta kehityskelpoinen prototyyppi.</p> <p>Anturiyksiköt mittaavat ensisijaisesti kosteutta, lämpötilaa ja matalaa differentiaalipainetta. Nämä ovat tärkeimmät ominaisuudet käyttötarkoitusta ajatellen. Kerättävä data on laitteiston puolesta laajennettavissa ulkoisilla I2C- tai OneWire-väyläisillä antureilla myös muun tyyppisiin mittauksiin ja tilatietoihin.</p> <p>Loggerilaitteen tehtävänä on välittää antureiden sille lähettämä data tietokantaan ja tehdä etänä tai paikallisesti komennettavia anturien konfigurointeja. Verkon testauksen aikana loggerilaitetta simuloitiin toisella anturiyksiköllä, koska loggerilaitteeseen ei tätä opinnäytetyötä tehtäessä ollut olemassa suoraan käyttökelpoista ja laitteelle portattua ohjelmistoa.</p> <p>Laitteet toimivat langattomasti omalla räätälöidyllä protokollalla toteutetussa verkossa joka on itse reitittävä, itse korjautuva ja pienikulutuksinen. Verkko on rajatusti kaksisuuntainen (antureiden konfigurointi ja datan kuittaukset).</p> <p>Laitteistoa on tarkoitus käyttää osana Lamit oy:n palvelukonseptia.</p>		
Avainsanat (asiasanat) Langaton, anturi, Lamit, mittaus, verkko, tiedonkeruu, elektroniikka, ohjelmisto, suhteellinen kosteus, paine		
Muut tiedot		



Author(s) MIEKKAVAARA, Jaakko	Type of publication Bachelor's Thesis	Date 12.10.2012
	Pages	Language Finnish
	Confidential () Until	Permission for web publication (X)
Title WIRELESS CONDITION MONITORING SYSTEM FOR BUILDINGS		
Degree Programme Information Technology		
Tutor(s) KOTKANSALO, Jouko		
Assigned by Lamit Oy		
<p>Abstract</p> <p>In the assignment, sensor devices (HW and SW) and sensor data collecting logger (HW only) device were designed and built. The intention was to make the software for logger device as a part of another bachelor's thesis. The goal was to have a viable prototype of the system for further development purposes.</p> <p>Sensor devices are primarily intended for measuring humidity, temperature and low level differential pressure, which are the most important factors considering the purpose. From hardware point of view, collected data is extendable to other types of measurements and state information with external sensors and devices using I2C or OneWire bus.</p> <p>The purpose of the logger device is to provide a gateway between sensors and database and to make sensor configurations remotely or locally. When testing the sensor network, the logger existence was simulated with another sensor device, as there was no usable and ported software for the logger hardware during the writing of this bachelor's thesis.</p> <p>Devices work wirelessly through a specifically tailored, self-made protocol, composing a network which is self routable, self healing, and has low power consumption. The network is partially bi-directional (sensor configurations and data acknowledgements).</p> <p>The system is intended to be used as a tool of service concept of Lamit oy.</p>		
Keywords Wireless, sensor, Lamit, measurement, network, data logging, electronics, software, relative humidity, pressure		
Miscellaneous		

SISÄLTÖ

1 TAVOITTEET JA LÄHTÖKOHDAT	3
1.1 Käyttötarkoitus.....	4
1.2 Vaatimusmäärittelyn tavoitteet	5
1.3 Vaatimusmäärittelyn lähtökohdat	6
1.4 Laitteistolta vaadittavat toiminnot.....	7
1.5 Ulkoiset liitännät	9
1.6 Muut ominaisuudet	10
1.7 Laatusuunnitelma	11
1.8 Laitteiden yleinen vaatimustenmukaisuus	14
2 LAITTEISTO (HW)	15
2.1 Anturiyksikön suunnittelu	25
2.2 Loggerilaitteen suunnittelu	50
3 OHJELMISTO (SW).....	60
3.1 Käytettävät kehitystyökalut	61
3.2 Anturiyksikön ohjelmistoarkkitehtuuri	61
3.3 Protokolla radiolle	62
3.4 Anturiyksikkö.....	65
3.5 Loggerilaite	69
4 KENTTÄTESTI	70
4.1 Kokoonpano	70
4.2 Testitulokset ja kehitysehdotuksia	70
LÄHTEET.....	74

LIITTEET

LIITE 1. Saturoituneilla suolaliuoksilla luotuja suhteellisen kosteuden referenssejä.	
.....	77

KUVIOT

KUVIO 1. Folded dipole reference design – integroidun antennin suuntakuvio XY-tasossa tarkasteltuna (etu- ja takakeila). Antenni vaakapolarisaatiotasossa.....	21
KUVIO 2. Anturiyksikön lohkoakaavio. MCU:n oleelliset osat on korostettu.....	26
KUVIO 3. Virtanapin ja UI:n ohjauskytkentä suojauksineen.....	31

KUVIO 4. Differentiaalisen 4 INCH-D-CGRADE paineanturinanturin mittasilta.	39
KUVIO 5. Paineanturin mittasillan ekvivalentti kytkentä.	39
KUVIO 6. $1/f$ kohinan malli. Malliin tulee luonnostaan myös lämpökohinaa, jonka taso haetaan ideallisella vahvistimella E1.	40
KUVIO 7. Kuvion 6 kytkennän mallinnettu $1/f$ kohina.....	41
KUVIO 8. Kytkennän kaistan yli integroitu kokonaiskohina.	42
KUVIO 9. Anturiyksikön piirilevy ja kotelo.....	48
KUVIO 10. Koteloitu anturiyksikön prototyyppi.	49
KUVIO 11. Pääkäyttöjännitteen hakkuriteholähteen piirikaavio.	57
KUVIO 12. Anturiyksikön ohjelman arkkitehtuuri.	62

TAULUKOT

TAULUKKO 1. Siirtotien vaimennus erilaisissa ympäristöissä.....	18
---	----

1 TYÖN LÄHTÖKOHDAT

1.1 Tehtävän kuvaus ja toimeksiantaja

Työn tarkoituksena oli luoda suolahtelaiselle Lamit.fi:lle kehityskelpoinen prototyyppi laitteistosta, joka kykenee keräämään kiinteistön ylläpidon, rakentamisen ja energiankulutuksen kannalta oleellisen datan siten, että data on käytettävissä reaaliajassa. Lisäksi järjestelmän täytyy olla joustava, eikä sen asentaminen ja käyttöönotto saa vaatia asentajilta suurempaa erityisosaamista. Järjestelmän täytyy olla helposti siirrettävissä ja muokattavissa.

Lamit.fi on pienehkö suolahtelainen palvelualan alan yritys, joka on erikoistunut energiaselvitysten, -todistusten ja -tehokkuuskonsultointien tekemiseen. Energiatodistusten taustalla on lainsäädännön uudistuminen rakennusten energiankulutukseen liittyen. Uusi laki on tullut voimaan uudisrakennuksia koskien 1.1.2008 ja vuoden 2009 alusta se on laajentunut koskemaan myös vanhojen rakennusten energiankulutusta. Lamit.fi on perustettu 1995. Lamit on akronyymi sanoista laatu, laskenta ja mitoitus. Yritys tarjoaa myös verkkopohjaisia ratkaisuja erityyppisiin energiataloudellisiin kartoituksiin ja mitoituksiin, ja tämän työn tarkoitus on laajentaa tätä konseptia. (Lamit.fi, 2009.)

Opinnäytetyö tarjottiin PDisain oy:n kautta, joka on niin ikään suolahtelainen yhden miehen suunnittelutalo. Työ on lohkottu kahteen osaan, joista osa on tämän työn aiheena ja toinen osa toisen opinnäytetyön pohjana. Opinnäytetyöt lomittuvat samaan edellä kuvattuun laitteistoon siten, että tämän opinnäytetyön osa-alue kattaa tiedon mittaamiseen ja eteenpäin välittämiseen käytettävien langattomien anturiyksiköiden HW- (piirisuunnittelu ja layout) ja SW-suunnittelun ja toteutuksen, sekä anturiyksiköiltä tiedot palvelimelle välittävän loggerilaitteen HW-suunnittelun ja toteutuksen. Tässä työssä toteutettujen anturiyksiköiden tulee ensisijaisesti kyetä mittaamaan lämpötilaa ja kosteutta, mutta toteutuksessa myös muiden parametrien mittaaminen on tehty mahdolliseksi ulkoisen digitaalisen anturin liitännän kautta. Oleellisten parametrien (liikennöintikanava, tehtävät mittaukset, mittausten aikaväli, ym.)

tulee olla etänä muutettavissa. Toisen opinnäytetyön vastuualueena on samantapaisen, lämpötilan mittaamiseen tarkoitetun anturiyksikön suunnittelu (SW ja HW) ja toteutus, sekä edellä mainitun loggerilaitteen SW:n toteutus.

1.2 Käyttötarkoitus

Laitteita on tarkoitus käyttää mittaamaan perusparametreja hyvinkin vaihtelevista ympäristöistä. Mittaustarvetta on alustavasti suhteelliselle kosteudelle (ilman kosteus, materiaalin kosteus), lämpötilalle, absoluuttiselle paineelle ja differentiaaliselle paineelle.

Yrityksen konseptiin liittyen kosteusmittauksia täytyy pystyä tekemään sekä ilmasta että rakenteista. Erityisen tärkeää on kyetä mittaamaan betonin suhteellisia kosteuksia kuivumisvaiheessa, jolloin mitattavat suhteelliset kosteudet ovat varsin korkeita, ja anturi saattaa olla joissain tilanteissa (joskaan ei tarkoituksellisesti) betoniin upotettuna. Sen täytyy siis selviytyä toimintakykyisenä vielä pitkästäkin upotuksesta mineraalipitoisessa liejussa. Pääsääntöisesti anturi on onteloituna pienessä tilavuudessa betonin sisässä, jolloin kosteuden mittaaminen onnistuu riittävällä tarkkuudella ja lyhyellä vasteajalla. Erityisesti betonin valukosteuden tarkkailussa tämä on tärkeää, sillä valun jälkeisiin pintatöihin täytyy päästä heti kun mahdollista mutta samalla on oltava varmuus siitä että valu on riittävän kuiva. Töiden aloittamista saatetaan joutua venyttämään pitkällekin, jotta voidaan varmistua riittävästä kuivumisasteesta. Lämpötilamittauksilla on tarkoitus kyetä mittaamaan pieniäkin lämpöeroja ja niistä seuraavia lämpövirtoja eri tilojen välillä, mikä edellyttää antureilta hyvää absoluuttista tarkkuutta stabiilisuutta kompensointikykyä ja tarkkaa kalibrointia.

Differentiaalisella paineen mittauksella on tarkoitus tehdä ilman virtausmittauksia joko huoneistossa tai ilmastointilaitteistosta. Huoneistoa mitattaessa vaikeutena on ilman virtauksen arvioiminen paine erojen perusteella. Virtaamaan vaikuttavat paineen lisäksi huoneiston fyysiset mitat ja muodot. Ilmastointikanavista paine sen sijaan voidaan yleensä mitata siihen kuuluvista standardoiduista säätö-, toimi-, suodatus- ja mittauslaitteista, joiden tunnettujen parametrien perusteella voidaan laskea ilman virtaama. virtausmittaus voidaan tehdä differentiaalisella anturilla mittaamalla

paine laitteen laitteissa olevien kahden mittapisteen yli tai vertaamalla päätelaitteen mittauspisteen painetta huonetilan paineeseen (jälkimmäisen mittaamiseen soveltuisi myös absoluuttinen paineanturi). Ilmavirta q (yksikkö l/s) saadaan mitatusta paine erosta

$$q_v = k * \sqrt{\Delta p_m},$$

missä Δp_m on mitattu paine-ero Pascaleina. Kun tiedetään mitatun laitteen niin sanottu k -kerroin, se voidaan laittaa myös anturiyksikön ohjelmaan laskentaparametriksi, jolloin anturilta saadaan suoraan laskettu ilmavirta. Paine on edellä olevassa kaavassa Pascaleina. Menetelmää voidaan näin käyttää laajasti, eikä sen käyttöönotto vaadi kohtuuttomasti alan tietämystä. Laitteen asentajan tarvitsee vain löytää mitaushaarasta laite jossa on kyseinen kiinteä mittauspiste, ja lukea laitteessa olevasta tyyppikilvestä (yleensä löytyy kaikista laitteista, laitteiston oppaista tai viimeistään valmistajalta) sille ilmoitettu k -kerroin, joka haluttaessa voidaan syöttää loggerilaitteelle. (Ilmavirtojen mittaus- ja säätöopas 2010, 1, 6-8.)

Kiinteillä mittauspisteillä varustettujen pääte- ja toimilaitteiden mittapisteiden paine-ero on laitteen käytännöllisissä toimintarajoissa yleensä 0...400Pa:n välillä. Jotta saadaan riittävä toimintamarginaali mutta päästään silti hyvään tarkkuuteen, voidaan differentiaalinen paineen mittausalue rajata anturiyksiköllä arviolta noin 0...1kPa:n. Lopullinen skaala määräytyy käytettävien anturien ominaisuuksien ja mittauksia rajoittavan kohinan mukaan. (Ilmavirtojen mittaus- ja säätöopas 2010, 9-12; SFS 5512 1992)

1.3 Vaatimusmäärittelyn tavoitteet

Betonin kosteus saadaan suoraan mittaamalla betoniin tehdyn ontelon suhteellinen kosteus. Jotta mittautieto olisi päätöksenteon kannalta hyödyllistä, yleisenä vähimmäistarkkuusvaatimuksena suhteelliselle kosteudelle pidetään noin +/-2% absoluuttista tarkkuutta.

Tässä työssä lämpötilan mittaus on oheisparametri, joka täytyy selvittää anturin ympäristöstä suhteellisen kosteuden määrittämistä varten. Tämä edellyttää myös lämpötilan mittauksesta absoluuttisesti tarkkaa. Koska kosteus mitataan absoluuttisena kosteutena, ja tällä mittauksella on rajallinen tarkkuus, tulee suhteellisen kosteuden mittauksesta riippuvainen näiden kahden parametrin tarkkuudesta. Koska näiden parametrin tarkkuudet puolestaan määrittävät toisiaan, täytyy ensimmäisen parametrin absoluuttinen tarkkuus valita jollekin kohtuullisesti saavutettavissa olevalle alueelle, ja toisen tarkkuus perustuen ensimmäisen parametrin tarkkuuteen ja edellisessä kappaleessa määritettyyn suhteellisen kosteuden absoluuttiseen tarkkuuteen. (Aloituspalaverit ja käydyt keskustelut työn tilaajan kanssa, 2008)

1.4 Vaatimusmäärittelyn lähtökohdat

Laitteiston kuvaus

Laitteisto on itsenäinen langaton anturiverkko, joka tallentaa mittaustulokset keskitetysti. Antureita pitäisi pystyä liittämään verkkoon mahdollisimman paljon, jotta järjestelmä olisi hyödyllinen, oletettavasti ainakin noin 10-20 kappaletta. Antureihin kuuluvat aluksi ainakin yksiköt lämpötilan, kosteuden ja pienien paine-erojen mittaamiseksi. Järjestelmä on tarkoitus tehdä laajennettavaksi antureidenkin osalta, mikä saadaan tekemällä järjestelmä modulaariseksi sopivilla väylävalinnoilla.

Laitteiston käyttäjät

Laitteita käyttävät aluksi lähinnä LVI-alan yritykset, joiden on tärkeää saada tietää esimerkiksi rakennusvaiheen jälkeen LVI-laitteiston toiminta ylösajon jälkeen. Laitetta voivat käyttää myös kaikki tahot joiden tarvitsee tehdä laitteistoon säätöjä tai huoltoja säätökohteiden selvittämiseksi. Toinen pääkäyttötarkoitus on perustusten ja muiden betonivalujen kuivumisen tarkkailu sekä tähän liittyen ympäristön lämpötilan tarkkailu rakennustyömailla. Implementoitaessa käyttöliittymään etähallinta ethernet-liitäntää tai GPRS:ä käyttäen, laajentamalla laitteiden toimintoja (ohjelmistoa) sekä hyödyntämällä laitteiston kaksisuuntaisuus voidaan laitteisto muokata myös kevyeksi kodinautomaatiosovellukseksi, jolloin se olisi käytännöllinen kenelle tahansa kuluttajalle. (Aloituspalaverit ja käydyt keskustelut työn tilaajan kanssa, 2008)

Käyttöympäristö

Laitetta käytetään tiettävästi kovissakin olosuhteissa suureksi osin konehuoneiden yhteydessä kylmissä olosuhteissa. Esimerkkinä IV-konehuoneet, joissa voi kokemuspohjaisesti olla jatkuvaa mekaanista tärinää ja lämpötila tyypillisesti asuinkiinteistöissä n.+10...+35°C (vakaahko, kuiva), ja teollisuusympäristössä tyypillisesti n.+5...+60°C (vaihteleva, kostea). Rungas pöly on yleistä saneerauksien yhteydessä ja teollisuudessa. Lisäksi konehuoneisiin sijoitettaessa radioliikenteelle ongelmaksi voivat muodostua massiivisten koneiden monikerroksiset ja laakeat peltipinnat. Yhdessä muutenkin paksujen ja vahvasti raudoitettujen betonirakenteiden kanssa puhutaan paikoin todella vaikeasti liikennöitävistä ympäristöistä. Lisäksi konehuoneissa on paljon EMC -häiriöitä (johtuen tehovastuksista, moottoreista, kytkimistä, taajuusmuuntajista, vahvoista ohjaussignaaleista, yms.), joten anturin EMC suojauksesta ja hyvien suunnitteluperiaatteiden noudattamisesta on pidettävä kiinni luotettavuuden varmistamiseksi. (Aloituspalaverit ja käyty keskustelut työn tilaajan kanssa, 2008)

1.5 Laitteistolta vaadittavat toiminnot

Anturiyksikkö

Anturiyksiköltä vaaditaan vaatimusmäärittelyn, käytyjen keskustelujen ja pohdiskelujen sekä alustavien valintojen perusteella ainakin seuraavat perustoiminnot:

- AD muunnos anturilta
- Mittaustiedon tilapäistallennus. Tämän tulee olla riittävän pitkä tallentamaan tieto myös lyhyiden yhteyskatkoksien ajalta. Olettaen että mittaustieto rekisteröidään keskimäärin minuutin välein ja kahden kuukauden ajan, muistin pituuden tulee olla vähintään 864 000 mittausta. Jos vastaanotettu mittaustieto sisältää tiedon anturitunnuksen (8 bittiä), mittaustiedon tyyppitunnuksen (8 bittiä), mittaustiedon (16 bittiä), aikaleiman (32 bittiä), tulee anturiyksikön haihtumattoman muistin tarpeeksi 6912 kB, mikä on helposti implementoitavissa. Käytännössä tämä kuitenkin tarkoittaa ulkoista muistipiiriä.
- Useita AD-muuntimen kanavia voidaan käyttää eri suureiden mittaamiseen samalla laitteella.

- Radion tulee olla parametroitavissa käyttöympäristöä varten. Alustavasti liikennöintiä varten Texas Instrumentsin CC2500, 2,4 GHz:n toimintataajuudella toimiva kaksisuuntainen liikennöintiä varten tai mahdollisesti yksisuuntainen lähempiiri CC2550.
- Mittaustiedon edelleen lähettäminen emolaitteelle, kun siihen saadaan yhteys.
- Mahdollisesti luku paikan päällä. Esimerkiksi painonappia painettaessa mittausarvon tulostus 7-segmenttinäytölle.
- Statusindikaattorit (yhteyden tila, pariston tila, aktiivisuus, lataustilat)
- Automaattinen itsekonfigurointi haihtumattomista muisteista kun laite käynnistetään.
- lähetystehon sekä vastaanoton herkkyyden säätö. Herkkyyden säätö tapahtuu käytännössä datanopeutta, kaistanleveyttä ym. Parametroitavan CC2500 radion parametreja säätämällä.
- Tarvittaessa voidaan lämpötilaa välillä -35...+120°C mitata n. 0,5...2,5°C tarkkuudella (kalibrointimenetelmästä riippuen) myös kytkemällä AD -muuntimelle CC2500/CC2550 –piirin oma sisäinen lämpötila-anturi.
- Anturi voidaan tarvittaessa kytkeä johdon päähän, jotta saadaan järjestettyä toimiva radiolinkki.
- CC2500 sisältää myös Wake On Radio (WOR) piirin, jota voidaan käyttää laitteen herättämiseen virransäästötilasta.

Loggerilaite

Loggerilaite huolehtii kerätyn tiedon ja konfigurointidatan kanavoinnin anturien ja nettipohjaisen käyttöliittymän välillä. Sen tulee kyetä seuraaviin toimintoihin:

- Jos anturiyksikkö ei saa yhteyttä emolaitteeseen määräajassa, emolaite ilmoittaa asiasta.
- Antureiden tilantarkistukset ja viimeisimmät mittatiedot tulee olla luettavissa LCD näytöltä.
- Anturiyksiköiden lähettämän mittaushistorian tallennus olettaen, että mittaus-tieto rekisteröidään 20 anturilta keskimäärin minuutin välein ja kahden kuukauden ajan → 1 728 000 mittausta. Jos vastaanotettu mittaustieto sisältää anturitunnuksen (8 bittiä), mittaustiedon tyyppitunnuksen (8 bittiä),

mittaustiedon (16 bittiä), aikaleiman (32 bittiä), tulee emolaitteen haihtumattoman muistin tarpeeksi vähintään 13,824 MB, mikä on helposti implementoitavissa.

- Muistina mahdollisesti muistikortti (SD, MMC)
- Alustavasti liikennöintipiiriksi Texas Instrumentsin CC2500, 2.4GHz toiminta-
taajuudella toimiva kaksisuuntainen liikennöintipiiri.

1.6 Ulkoiset liitynnät

Käyttöliittymä

Anturiyksiköiden konfigurointi hoidetaan pääasiallisesti emolaitteen kautta. Tarvittaessa implementoidaan myös langallinen yksinkertainen sarjaliitäntä konfigurointia varten, esimerkiksi kun langaton yhteys oletuskanavalla on estetty jonkin vahvemman signaalilähteen takia. Antureille tulee yhden näppäimen ja 7-segmenttinäytön käsittävä käyttöliittymä tilantarkistusta, tai konfigurointia varten. Mittaustiedot luetaan emolaitteelta USB tai GPRS liityntää käyttäen, myöhemmin mahdollisesti ethernet-liitännän kautta. Emolaitteeseen tulee lisäksi jonkinlainen pieni käyttöliittymä, josta voi tarkastaa antureiden tiloja ja lukea viimeisimpiä mittaustietoja. (Aloituspä-laveri ja käydyt keskustelut työn tilaajan kanssa, 2008)

IO-liitännät

Liitäntöihin kuuluvat aluksi radiolinkit anturiyksiköiden ja emolaitteen välille, USB -liitäntä emolaitteen datan purkamiseksi, yksinkertainen käyttöliittymä emolaitteelle (LCD) ja antureille (7-segmenttinäyttö) antureiden ja laitteiden tilan tarkistamiseksi, emolaitteen käyttöjänniteliitäntä ja yksinkertainen (ISP, UART, TWI...) liitäntä laitteiden manuaaliseksi ohjelmoimiseksi tarvittaessa. Anturiyksiköiden paristoliitännät tulevat laitekotelon sisään.

Myöhemmin jatkokehittelyn yhteydessä käyttöliittymä ja etähallinta voidaan hoitaa GPRS:n tai ethernet-liitännän kautta, ja liikennöinti antureille (tai osalle antureita) voidaan mahdollisesti tulevaisuudessa hoitaa ZigBee -liitännän kautta. Mahdolliset tiedossa olevat kehitysmuutokset huomioidaan elektroniikan modulaarisuudessa ja mahdollisuuksien mukaan myös ohjelmistosuunnittelussa ja ohjelmiston arkkitehtuu-

riissa niin, ettei suurempaa uudelleensuunnittelua tarvita, vaan lisäominaisuudet voidaan toteuttaa uutena ohjelmistokomponenttina.

1.7 Muut ominaisuudet

Jotta laitteiden (antureiden) todennäköisesti piirilevylle integroidut antennit toimisivat esteettä, täytyy koteloiden olla johtamatonta materiaalia (ei hiiltä, metallia tai muuta johtavaksi seostettua tai pinnoitettua muovia). Kotelona voidaan käyttää anturiyksiköllä myös elektroniikan ympärille valettavaa massaa ("moldaus"), jolloin koteloinnilla voidaan saavuttaa myös täydellinen tiiveys. Anturiyksiköiden tehontarve on välttämätöntä saada todella pieneksi, jotta akku kestää edellytetyn ~2 kk:n toiminta-ajan. Anturimoduulien mittausaluet ja tarkkuudet ovat alustavasti

- lämpötilan osalta alue -50...+120 °C, vähintään 0,1 °C tarkkuudella
- ilmankosteuden osalta alustavasti alueella 5...95 %RH, +/-2 %-yksikön tarkkuudella
- paineen osalta
 - differentiaalimittauksessa (esim. suodattimen tai säätöpellin yli) alueella 0...15...150Pa, +/-1...5 % (Ilmavirtojen mittaus- ja säätöopas 2010, 2010, 26-29, 31-33)
 - Mitta-alueen on ulotuttava normaalia ilmakehän painetta mitattaessa ainakin välille 80...110 kPa, jolloin voidaan toimia alle 0...25 km:n korkeudella merenpinnasta ja voidaan toisaalta mitata normaaleja ilmanpaineen vaihteluita. Mittaustarkkuuden tulisi olla vähintään +/-1 %. Lisäksi mitattaessa esimerkiksi tuloilmakanavan puhallinpainetta absoluuttisena, paine voi vaihdella ilmakehän paineeseen nähden +/- 10 kPa, joten absoluuttipainetta tulee pystyä mittaamaan välillä 70...120 kPa. (Kysymyksiä ja vastauksia – Ilmanpaine 2007; LVI RakMK-00421 2009)

Edellä olevien mittausten lisäksi voidaan jokaiseen anturiyksikköön lisätä mahdollisuus mitata yksinkertaista 1/0-tilatietoa (esimerkiksi relekytkimien tilatietoa). Paineen osalta differentiaalimittaus tehdään ympäröivään huoneilmaan nähden. Koska differentiaalista ja absoluuttista painetta mitattaessa mittaustarpeiden erot ovat suuria,

voi olla tarpeen käyttää kahta eri anturia. Periaatteessa voisi olla mahdollista käyttää myös pelkästään differentiaalista anturia, jolle tuotaisiin toiseen porttiin painereferenssi ympäröivästä ilmakehästä absoluuttista painetta mitattaessa.

Jokaisella anturilla tulee olla oma yksilöllinen tunnus, jonka se lähettää emolaitteelle jokaisen mittaustiedon mukana. Näin yksittäiset mittaustiedot voidaan yhdistää mitauskohteeseen. Datan langaton siirto toteutetaan käyttäen 2,4000...2,4835 GHz:n ISM-kaistaa (CC2500 radiopiiri), joka on yleisesti sallittu ISM-liikenäöntikaista useimmissa maissa.

1.8 Laatusuunnitelma

Konseptin toimivuus ja levikki

Konseptin toimivuudesta ei ole tehty markkinatutkimusta, mutta potentiaalisia asiakkaita on tiedossa, ja yksi valmis tilaaja jolle laitteen käyttökelpoinen esiversio tehdään. Laitteistolle on tietävästi käyttöä, mutta kiinnostuksen laajuus selviää vasta myöhemmin kyselyjen ja messujen yhteydessä. Toteutettavien laitteiden volyymit oletetaan melko pieniksi. Loggerilaitteen kohdalla valmistusmäärät ovat oletettavasti alle 100kpl luokkaa ja anturiyksiköllä noin 10 kertaa loggerilaitteiden määrä, eli noin 1000 kpl luokkaa. Laitteita suunniteltaessa täytyy kuitenkin esimerkiksi varatussa kanavamäärässä, radiotien liikennöinti-protokollassa ja muussa ohjelmistossa huomioida noin 10 kertaiset laitemäärät näihin nähden.

Helppokäyttöisyys

Kaikki laitteet tehdään mahdollisimman helppokäyttöisiksi, niin että lähes kuka tahansa osaa hallita niitä. Tavoitteena on, että laitteiston asennuksen voi tehdä teknisesti vähemmän perehtynyt asentaja. Helppokäyttöisyys saadaan aikaan selkeällä ja yksinkertaisella käyttöliittymällä, yksinkertaisella ja lyhyellä ohjeistuksella ja automatisoimalla laitteet mahdollisimman pitkälle käyttäjästä riippumattomiksi (laitteiston itsekonfigurointi).

Luotettavuus

Jotta anturin radiolähetin (etäpää) toimii luotettavasti, täytyy linkin ”budjetin” (lähetysteho – siirtohäviöt - vastaanottimen herkkyys) olla reilusti suurempi kuin etäisyyden ja rakenteiden aiheuttama vaimennus toimintasäteellä, huomioiden myös paikoin vaikeakin käyttöympäristö. Periaatteeksi voitaisiin asettaa että oli anturi sijoitettu lähes mihin tahansa järkevään paikkaan normaalikokoisessa rakennuksessa, se pystytään lukemaan. Anturi jota joutuu ”paimentamaan” on kuormittava ja siltä kannalta ajateltuna asiakkaalle kallis. Laitteen luotettavuus varmennetaan tuotannon testauksilla (olosuhdetestaukset, EMC-testit, elektroniikan sähköiset testaustekniikat).

Laajennettavuus

Anturit tehdään helposti lisättäviksi, esimerkiksi automatisoimalla niiden havaitseminen emolaitteelle (konfiguroimattomalla laitteella ilmoitus vakiotajuudella emolaitteelle. Vaatimuksien osalta harkitaan myös kanavien valintaa erillisellä kanavanvalinta painikkeella ja 7-segmentti näytöllä. Antureiden (MCU:n) AD -muuntimet voidaan kanavoida eri tyyppisille antureille, ja samaan lähetinyksikköön voitaisiin liittää useampikin anturi (piuhojen päähän), jolloin ei tuhlata laitteita kun tarvitaan esimerkiksi virtausmittausta varten kahden vierekkäisen pisteen paine, tai tulevan ja lähtevän ilman/veden lämpötila. Koska liikennöinti piiri tulee olemaan kaksisuuntainen, on myöhemmin mahdollista lisätä anturiyksiköihin myös ohjaussignaaleja esimerkiksi toimilaitteille.

Elektroniikka suunnitellaan modulaariseksi, myös se on laajennettavissa tulevaisuuden tarpeita varten, eikä piirilevyä tarvitse suunnitella uudelleen. Koska ZigBee laitteet kasvattavat suosiotaan, emolaitteelle tulee mahdollisuus liittää laitteeseen sekä ZigBee –standardin mukainen liikennöinti piiri, jolloin laitteeseen olisi mahdollista liittää lähitulevaisuudessa myös muiden valmistajien langattomia antureita. Ohjelmisto tehdään helposti päivitettäväksi, mahdollisesti etäpäivityksen kautta.

Laitteistoa tullaan käyttämään oletettavasti vain Suomessa, joten sen tulee lähtökohdaisesti täyttää EU alueen yleiset vaatimukset.

Riippumattomuus eri käyttöympäristöistä

Emolaite pyritään tekemään järkevissä rajoissa mahdollisimman riippumattomaksi ympäristöstä, rajaten pois emolaitteen osalta kosteat tilat, äärimmäisen kylmät tai kuumat tilat ja ulkotilat. Tämä siksi että emolaitetta ei ole tarkoituksenmukaista, ja harvoin edes tarpeellista käyttää äärioloissa, koska laitteet on tarkoitettu sijoittamaan aina kiinteistöön, josta todennäköisimmin löytyy vakaahko sijoituspaikka. Emoyksikön kotelointiluokitus on alustavasti IP43.

Sen sijaan anturit voidaan sijoittaa hyvinkin karuihin olosuhteisiin, ja siksi ne pyritään tekemään säänkestäviksi (kotelointiluokitus alustavasti vähintään IP54), paristo tai akkukäyttöisiksi, ääriämpötiloissa toimiviksi (komponenttivalinnat) ja mekaanista tärinää sietäviksi. Radiolinkki voi toisinaan olla vaikeankin signaalitien takana, eikä anturiyksikön sijoituspaikkaa ole aina mahdollista valita, joten sen valintaan ja ominaisuuksiin täytyy kiinnittää erityishuomiota.

Sähkö- ja paloturvallisuus

Sähtöturvallisuudesta ei tarvitse työssä suuremmin huolehtia, koska kaikki elektronikka tulee olemaan pienjännitteistä ja paristo- tai akkukäyttöistä. Ainakin emolaite voi olla ajoittain valmiilla seinämuuntajalla (galvaanisesti) erotettuna valtakunnallisesta verkosta. Paloturvallisuus huomioidaan suunnittelussa pyrkimällä käyttämään palamattomia kotelointimateriaaleja, riittäviä eristysvälejä ja pieniä tehoja komponenteilla. Latausliitännät ja suorat liitännät akulle vikavirtasuojataan ja lisäksi loggerilaitteen akku suojataan latauksessa seuraamalla sen lämpötilaa ja kennojännitettä. Suunnittelussa on huomioitava että laitteen tulee täyttää turvallisuuden osalta EU-alueella vaadittavat LVD-direktiivit, joten kaikkien fyysisten liitäntöjen tulee olla sen mukaisesti suojattuja. Laitteen kannalta tämä edellyttää käytännössä vähintään hallittua tuhoutumista ylikuormitustilanteessa.

Dokumentoinnin taso

Koska työ tehdään opinnäytetyönä Jyväskylän ammattikorkeakoululle, ja työtä tullessaan todennäköisesti kehittelemään edelleen opinnäyteprosessin jälkeen, dokumentointi tulee sisältämään kaiken oleellisen tiedon ja tutkimustulokset sikäli kuin niitä on järkevää taltioida. Työn kaupallisuudesta ja asiakkaan toivomuksesta johtuen do-

kumenteista tehdään kaksi eri versiota, joista tarkempi ja laajempi tulee tilaajalle (Lamit) ja toinen, sisällöltään suppeampi dokumentointi Jyväskylän ammattikorkeakoululle.

Testaus ja tuotannon laadunvalvonta

Jotta laatu pystytään varmistamaan, elektroniikasta pyritään tekemään helposti testattavaa. Anturiyksiköiden osalta voitaisiin käyttää neulatekniikoita, koska ne luultavimmin tulevat sisältämään piirejä, joita ei voida muutoin tehokkaasti testata. Emolaitteeseen voidaan implementoida BSCAN:ia tukeva komponentti, jolloin kytkentöjen ja dataväylien testaus voidaan pitkälle hoitaa JTAG-testiväylän kautta. Molemmissa laitteissa voidaan pienen volyymin takia käyttää lisäksi systeemitestausta. Valmiissa tuotteessa systeemitestaus täytyy tehdä referenssiantennilla ja referenssiolosuhteissa, jotta laatua voidaan valvoa ja koska erillistä testausliityntää esimerkiksi radiolinkille ei implementoida. Työssä tehtävän prototyypin osalta käytetään kaikilta osin systeemitestausta ja manuaalisia mittauksia. Rajat testattaville parametreille haetaan tuotantokelpoisten laitteiden parametrien otannalla, kun ne on varmistettu riittävän hyväksi (esimerkiksi lähetystehon osalta).

1.9 Laitteiden yleinen vaatimustenmukaisuus

Standardit

Tätä työtä tehdessä EU-alueen vaatimukset työn mukaiselle 2,4 GHz:n mittalaitteelle perustustuivat EU:ssa lainvoimaiseen 1999/5/EC-direktiiviin (R&TTE-direktiivi), joka kokoaa radiolaitteiden vaatimukset. Tästä seuraavia vaatimuksia ja tätä täydentäviä vaatimuksia ovat muunmuassa:

- EN 300 440 (ERM SRD laitteille taajuuskaistalla 1-40 GHz)
- 93/68/EEC (CE-merkintä)
- 2002/95/EC (RoHS direktiivi)
- 2002/96/EY (WEEE direktiivi)

Lisäksi laitetta koskevat harmonisoidut (tuotekohtaiset) vaatimukset:

- EN 55022 (EMC: Emissiovaatimukset ITE radiolaitteille)
- EN 55024 (EMC: Immuneettivaatimukset ITE radiolaitteille)

Tätä listaa voidaan käyttää apuna suunnittelussa ja kehityksessä. Laitteen lähetin tulee menemään EN 300 440-standardin luokkaan 8. (EN 300 440, 21). Huomattavaa on myös että LVD-direktiiviä 2006/95/EC ei tarvitse soveltaa koska liitännöille direktiivin soveltamisessa edellytetyjä jänniterajoja ei ylitetä. Myöskään mittalaitteille tarkoitettua 2004/22/EC-direktiiviä ei tarvitse soveltaa. Nämä ovat merkittävä kustannussäästö pienivolyymisen mittalaitteiston kehityskustannuksissa. (European Telecommunications Standardization Institute 2010; 1999/5/EC 2009.)

Normaalisti radion suunnittelu olisi merkittävä erillinen suunnittelu ja iterointityö, ja erikseen tulisi selvittää standardien tarkat vaatimukset radiolle, ja suunnitella radio siten että vaatimuksiin päästään. Tässä tapauksessa suunnittelun pohjana käytetään TI:n tekemää referenssisuunnittelua, jolla vaatimuksien on jo todettu täyttyvän.

2 LAITTEISTO (HW)

2.1 Laitteiston yhteiset osat

Yleisesti

Molemmille laitteille (anturiyksikölle ja loggerilaitteelle) yhtenäisiä osioita ovat radio, kiinteä flash-muisti, prosessori ja soveltuvilta osin virtalähteet. Molemmilla laitteilla on kuitenkin omia erityispiirteitä, jotka vaativat näiden lohkojen sovittamista kummallekin laitteelle paremmin soveltuviksi mahdollisimman pienin kustannuksin. Lohkojen sovittamisessa huomioidaan etenkin virtalähteiden optimointia häviöiden ja kuorman suhteen, terminointien ja tilan tarvetta sekä radion antenniliitännän tarvetta. Molemmissa laitteissa päätettiin käyttää Texas Instrumentsin MSP430-sarjan mikro-ohjaimia, joista löytyy sopiva skaala eri ominaisuuksilla varustettuja piirejä molemmille laitteille. Tärkeä valintakriteeri oli myös kehitystyökalujen hinta ja saatavuus (ks. luku 3.2).

Radion valinta ja linkin budjetti

Radiolaitteen on EU-alueella täytettävä standardit jotka määrittävät kokoavassa standardissa EN 300 440 (Lyhyen kantaman laitteet, SRD 2008). Sovelluksen kannalta

adiolle vaatimuksena oli, että se sisältää nopeat rutiinit pakettien oikeellisuuden tarkistamiseen ja vaatii kohtuullisen vähän ylemmän tason osallistumista itse datan lähettämiseen ja vastaanottamiseen. 2,4 GHz:n taajuusalue oli tätä työtä tehdessä ainoa täysin radioluvista vapaa radiotaajuus Suomessa (15AD/2010 M 2010).

Muut taajuusalueet vaativat lisäksi suurehkon antennin, joka on vaikeammin integroitavissa ja niille toteutetut tekniikat syövät myös paljon tehoa (alhaisemmat datanopeudet ja siitä seuraava pitkäköö datapaketin pituus). Huonona puolena 2,4 GHz:n taajuudelle on signaalin raju vaimeneminen ja esteiden suurehko vaikutus. Suurilla taajuuksilla antenni voi myös olla fyysiseltä kooltaan huomattavasti pienempi, ja sillä voi silti olla hyvä vahvistus.

Koska anturiyksiköt ovat paristokäyttöisiä, virran kulutus täytyy minimoida, joten lähetystehon tulee olla mahdollisimman alhainen ja vastaanottimen herkkyyden mahdollisimman hyvä. (Lindell 2000, 24.)

Kevyesti määrittelemällä linkin budjetilla tarkoitetaan radion lähetystehon ja sen herkkyyden erotuksen itseisarvoa antennilta mitattuna, siten että lähete saadaan onnistuneesti vastaanotettua. Se on siis lähettimen teho, johon summataan kaikki signaaliteoriassa mahdolliset häviöt (heijastukset, siirtotien vaimennus) ja vahvistukset (antennin suuntausvahvistus) sekä lähetyksessä että vastaanotossa ja josta vähennetään vastaanottimen herkkyyys. Kun tiedetään, miten radiosignaali vaimenee, linkin budjetti kertoo toimivan linkin muodostamiseen vaadittavan maksimietäisyyden.

Sisätiloissa 2,4 GHz:n radiosignaali heikkenee etäisyyden tuplaantuessa noin 10 dB, ulkotiloissa noin 6-7 dB. Jos huomioidaan myös signaalin fluktuaatio (tasonvaihtelut ihmisistä ympäristöstä ja kohinasta johtuen), täytyy saatuihin arvoihin lisätä noin 10 dB. Muita dokumentissa mainittuja laskelmia (ihmisten aiheuttamat tilapäiset esteet signaaliteoriassa ja monitie-eteneminen) ei tarvitse sovelluksen luonteen takia huomioida, vaan ei-kriittiset mittaustiedot ja ohjaukset voidaan lähettää uudestaan. Anturiyksikkö huolehtii, että sen lähettämä data saadaan lopulta välitettyä perille.

ITU:lla on suositus keskimääräisten siirtotien häviöiden arviointiin (ITU-R P.1238-1 1999). Malli on kehitetty sisätilojen häviöiden arviointia varten, ja sen parametrit ottavat huomioon myös eri ympäristöille tyypilliset rakenteelliset seikat.

$$L_{\text{total}} = 20 \log_{10}(f) + N \log_{10}(d) + L_f(n) - 28$$

- N Distance Power Loss Coefficient
- f Frequency (MHz)
- d Distance (m) between nodes ($d > 1$)
- L_f Floor Penetration Loss Factor (dB)
- n Number of Floors Penetrated ($n > 0$)

Taulukossa 1 on sinisellä taustavärillä rajattu käyttöalue, johon päästäisiin 103 dB linkin budjetilla (jollainen olisi esitutkimuksen perusteella helposti toteutettavissa Texas Instrumentsin CC2500 radiopiirillä).

Taulukossa 1 on laskettu ITU:n kaavalla siirtotien häviöt 2,45 GHz:n keskitaajuudella erilaisissa ympäristöissä (Office: toimistoympäristö, jossa usein useita keveitä väliseiniä; Commercial: Tyypillinen väljä ympäristö esimerkiksi ostoskeskuksissa tai maatiloilla; Residential: tyypillinen asuinkiinteistö tai kerrostalo). Arvot ovat viitteellisiä ja melko vahvasti riippuvaisia ympäristöstä. (ITU-R P.1238-1 1999.)

TAULUKKO 1. Siirtotien vaimennus erilaisissa ympäristöissä.

Office:

kerroksia	Etäisyys							
	30	40	50	60	80	100	125	150
1	83,9	87,7	90,6	92,9	96,7	99,6	102,5	104,9
2	98,9	102,7	105,6	107,9	111,7	114,6	117,5	119,9
3	102,9	106,7	109,6	111,9	115,7	118,6	121,5	123,9
4	106,9	110,7	113,6	115,9	119,7	122,6	125,5	127,9
5	110,9	114,7	117,6	119,9	123,7	126,6	129,5	131,9
6	114,9	118,7	121,6	123,9	127,7	130,6	133,5	135,9
7	118,9	122,7	125,6	127,9	131,7	134,6	137,5	139,9

Commercial:

kerroksia	Etäisyys							
	30	40	50	60	80	100	125	200
1	81,0	84,5	87,2	89,4	92,9	95,6	98,3	104,0
2	87,0	90,5	93,2	95,4	98,9	101,6	104,3	110,0
3	90,0	93,5	96,2	98,4	101,9	104,6	107,3	113,0
4	93,0	96,5	99,2	101,4	104,9	107,6	110,3	116,0
5	96,0	99,5	102,2	104,4	107,9	110,6	113,3	119,0
6	99,0	102,5	105,2	107,4	110,9	113,6	116,3	122,0
7	102,0	105,5	108,2	110,4	113,9	116,6	119,3	125,0

Residential:

kerroksia	Etäisyys							
	30	40	50	100	200	300	500	700
1	72,1	74,8	77,0	83,6	90,2	94,1	99,0	102,2
2	76,1	78,8	81,0	87,6	94,2	98,1	103,0	106,2
3	80,1	82,8	85,0	91,6	98,2	102,1	107,0	110,2
4	84,1	86,8	89,0	95,6	102,2	106,1	111,0	114,2
5	88,1	90,8	93,0	99,6	106,2	110,1	115,0	118,2
6	92,1	94,8	97,0	103,6	110,2	114,1	119,0	122,2
7	96,1	98,8	101,0	107,6	114,2	118,1	123,0	126,2

Pitkä kantama ”residential”- ja ”commercial”-tyyppisessä ympäristössä mahdollistaa esimerkiksi teollisuuden, maatilojen ja suurien kiinteistöjen automaatio- ja valvontasovellukset. Jotta järjestelmä toimisi moitteetta, täytyy siis systeemin lähettimen tehon ja vastaanottimen herkkyyden eron (-systeemin häviöiden + antennin vahvistuksen) olla joka tapauksessa yli 100 dB, jotta voidaan toimia suoralla linkillä myös keskisuurissa toimistokiinteistöissä (verkon ei ole pakko olla tähtimäinen, mutta täl-

löin se kuluttaa vähiten virtaa). Anturiyksiköiden sijoittelulla voidaan tietysti vaikuttaa paljon toiminta-alueen kattavuuteen.

Aivan kaikki anturiyksiköt eivät välttämättä voi olla koko ajan yhteydessä loggerilaitteeseen (tai yhteyslaitteeseen) katveiden takia, joten laitteissa on sisäinen flash-muisitpiiri. CC2500 täyttää vaatimukset, ja ilman antennin vahvistusta ja häviöitä voi antaa +1 dBm lähetystehon. Sen vastaanottimen herkkyys on tyypillisesti noin -97 dBm 20 kbps:n nopeudella, mikä on siltään hieman alle toivotun. Onneksi herkkyyttä saadaan parannettua -100 dBm:n, mikä saadaan kytkemällä vastaanottimen DC-filtteri pois päältä. Haittapuolena virrankulutus nousee muutaman milliampeerin RX-tilassa. 0 dBm tasolla lähetettäessä virrankulutus on reilut 20 mA. Piirissä on lisäksi sovelluksen kannalta tärkeitä ominaisuuksia kuten:

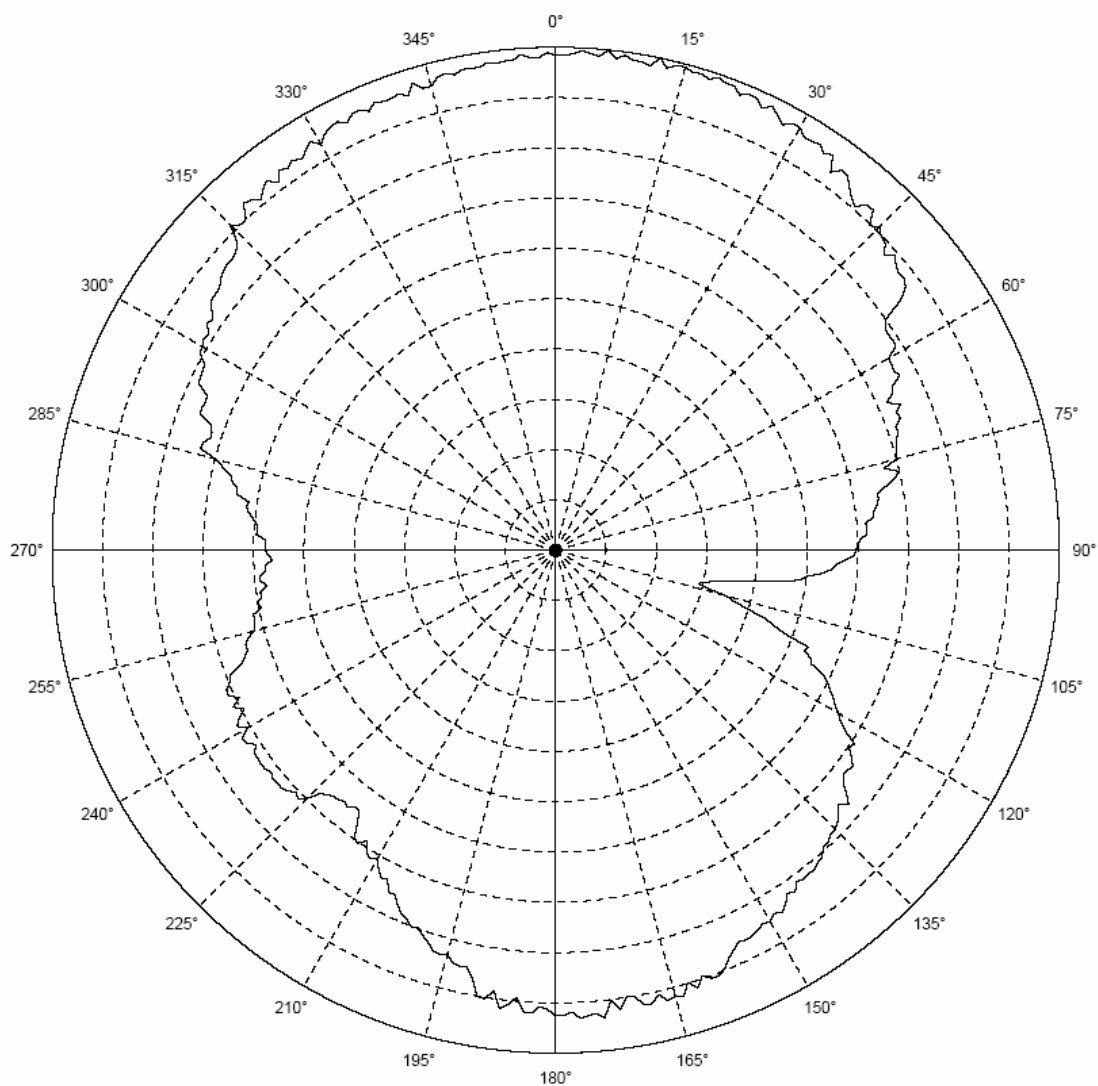
- erilaisia virransäästöominaisuuksia
- sisäisiä kalibrointiominaisuuksia
- erilaisia liikennöinti-protokollia
- täysin konfiguroitava modeemi ja modulaatio
- automaattinen virheentarkistus (CRC), virheenkorjaus ja viallisen paketin hylkäys
- vastaanotetun signaalin vahvuuden indikointi (RSSI)
- linkin laadun indikointi (LQI)
- RF-pollaus (WOR, Wake On Radio)
- SPI-liitäntä.
- oskillaattorin, SPI-väylän ja käyttöjännitteiden toiminta on helppo testata SPI väylän kautta.
- (äänenpakkausalgoritmi)

CC2500 piiri vaatii oman 26 MHz:n tai 27 MHz:n oskillaattorin RF-taajuuksien ja modulointitaajuuden syntetisointia varten. Oskillaattorin on oltava vähintään ± 40 ppm tarkkuudella nimellistaajuudella ja myös tähän tarkkuuteen on huomioitava kaikki virheet. TI:ltä löytyy piirille valmis antennisuunnittelu sovituksineen. Laskostettu dipoliantenni (Folded dipole – CC2500EM reference design) antaa vahvistusta jopa 3...7.4 dB (huomioiden siirtohäviöt) ja referenssisuunnittelussa koko systeemin ”budjetti” on parhaimmillaan yhteen suuntaan maksimissaan 113 dB. Antenni voidaan

syövyttää piirilevylle, joten se on myös halpa. Referenssisuunnittelun häviöiden minimi on taajuusalueella 2,400-2,445 MHz, joten käyttöön otetaan ensisijaisesti alemmat kanavat.

CC2500 piirin differentiaaliseen RF-lähtöön on mahdollista liittää myös valmiin suunnittelun pohjalta "single-ended" antenni, eli laskostetun dipoliantennin tilalla voisi olla esimerkiksi ympärisäteilevä johdon pätkä (sauva-antenni) tai niin sanottu "chip-piantenni", joka on tavallisesti keraaminen. Keraamisella antennilla saataisiin myös aikaan erittäin pienikokoinen antenni, koska antennin keraamiksi (substraatti) valitaan materiaali, jossa sähkömagneettisen aallon kulkunopeus on suhteellisen hidas. Hidas kulkunopeus tarkoittaa puolestaan lyhyttä aallonpituutta. Koska antennin elementit ovat aina aallonpituuteen suoraan verrannollisia ja käytännön antennit pääsääntöisesti sen sähköisen pituuden $\frac{1}{4}$ osan monikertoja, tulee seurauksena myös antennista pieni.

Kuviosta 1 voidaan nähdä että integroidun PCB antennin keilassa on hyvä vahvistus, mutta suuntaavuuden aiheuttamat nollakohdat on huomioitava. Käytännössä tämä käy esimerkiksi etsimällä paras suunta antennille tarkkailemalla signaalin vahvuutta ja kääntelemällä anturiyksikköä vaakapolarisaatiotasossa emoyksikköön nähden. Toiminto on ohjelmoitavissa laitteeseen. (ITU-R P.1238-1 1999; Link budget 2009; CC2500 datalehti 2009; CC2500EM reference design 2009)



Horizontal Polarization

CC2500 FD EM YZ

CF 2444.000 MHz

5 dB/ div

Ref Lev: 6.5 dBm

KUVIO 1. Folded dipole reference design – integroidun antennin suuntakuvio XY-tasossa tarkasteltuna (etu- ja takakeila). Antenni vaakapolarisaatiotasossa. (CC2500EM reference design 2009).

Passiivikomponentit

Kaikessa suunnittelussa suositaan pintaliitoskomponentteja niiden pienten ladontakustannusten vuoksi ja vältetään levystä läpivietäviä komponentteja tai erityiskäsiteltäviä komponentteja niiden korkeiden asennuskustannusten vuoksi. Loggerilaitteen kohdalla tästä voidaan joustaa pienehkön volyymin takia.

Yleiskomponenttien toleranssit eivät pääsääntöisesti ole merkittäviä, koska anturit kalibroidaan ja paineanturin sisältävän yksikön yhteyteen liitetään nollaustoiminto

(offset-kompensointi). Sen sijaan niiden lämpötilariippuvuuksien tulee olla pieniä, jotta pysytään riittävässä mittaustarkkuuksissa myös lämpötilan vaihdellessa. (kalibrointia ei ole aikomusta tehdä erilaisissa elektroniikkaosan lämpötiloissa, mikä olisi merkittävä kustannus). Poikkeuksena esimerkiksi vastuksilla toteutetut jännitteen jakajat ja vastaavat, joissa käytetään samantyyppisiä vastuksia. Tällaisissa piireissä samantyyppiset vastukset kompensoivat hyvinkin toistensa lämpötilariippuvuuksia. Voidaan siis käyttää pääosin halpoja, suuren lämpötilariippuvuuden omaavia vastuksia. Vastuksina käytetään kuitenkin kohinalle herkissä osissa pienikohinaisia kalvovastuksia.

CC2500-radion antennin balunissa, sovituksissa ja suodatuksessa käytettävien kelojen ja kondensaattoreiden tulee poikkeuksena olla pienitoleranssisia, jotta antennin sovitus saadaan mahdollisimman tarkasti suunnitelluksi. Samasta syystä näiden ja radion muiden reaktiivisten komponenttien täytyy olla todella hyvälaatuisia: pienet Parasiittiset osat eikä resonansseja alle 2,4 GHz:n taajuudella ja etenkin antenniliitännän suodatuskomponenteilla tämän täytyy päteä myös 2,4 GHz:n harmonisilla osilla, jotta radion lähetteen harmoniset osat ja muut hajalähteet saadaan vaimennettua. Passiivikomponenteissa tulisi suosia esimerkiksi kondensaattoreissa 0201 tai 0402 kotelokoja ja keloissa 0402 tai 0603 kotelokokoa, joissa nämä ehdot toteutuvat helpommin. Protolaitteistossa kotelokoosta saatetaan joutua tinkimään käsin juottamisen vuoksi, ja kaikkia komponenttiarvoja ei välttämättä nykytekniikalla voida valmistaa edellämainittuihin kokoihin, vaan joudutaan käyttämään suurempikokoisia komponentteja.

(Muratan valmistamien passiivikelojen ja kondensaattoreiden datalehdet ja ominaisuudet tuoteperheittäin 2011.)

Radion ja antennin sovitus voidaan varmentaa protolaitteistosta single ended antennin tapauksessa esimerkiksi syöttämällä antenniliitintään signaalia piirianalysointilaitteen avulla siten että CC2500 on vastaanottotilassa ja mittaamalla antennin heijastusvaimennus. Olettaen että CC2500:n RX- ja TX-suunnan impedanssi on lähelle sama, mitattu heijastusvaimennus pätee hyvin myös TX-tilan sovitukseen. (CC2500 datalehti 2009; CC2500EM reference design 2009; Return loss 2009.)

Kondensaattorien eristemateriaaliksi pyritään valitsemaan erityisesti analogisiin osiin materiaaleja, joiden kapasitanssi ei juuri muutu rakenteen mekaanisen värähtelyn seurauksena. Ilmiölle alttiita ovat esimerkiksi X7R-, Z5Y- ja 2E6-materiaalit, kun taas esimerkiksi COG- ja NPO-materiaalit eivät. Kun kondensaattorin kapasitanssi muuttuu, myös sen jännite muuttuu. Näin mekaaninen värähtely synnyttää piiriin sähköisiä värähtelyjä, joka voi häiritä mittausta tai jopa moduloida lähetettä. Tällaisten säännöllisten värähtelyjen vaikutus mittaustulokseen voidaan minimoida keskiarvoistamalla, mutta häiriöiden syntymahdollisuus on kuitenkin syytä eliminoida. Värähtelyjen estämiseksi anturin mittaussiirimeen kuuluvien, ja muiden käyttöjännitteeseen vahvasti (pienen impedanssin kautta) kytkettyjen kondensaattorien eristemateriaalin tulee olla sellaista materiaalia etteivät mekaaniset värähtelyt vaikuta kondensaattorin kapasitanssiin.

Erityistä huomiota vaativia passiivikomponentteja on etenkin CC2500 radiolla. Erityisesti kondensaattoreita ja keloja kokoonpanoon valittaessa on ehdottomasti tarkistettava että niiden loiskomponentit (ESL tai ESR) eivät rajaa käyttökelpoista taajuus- aluetta ennen 2,5 GHz:ä. Harmonisia yliaaltoja ja häiriöiden pois suodattamista ajatellen olisi hyvä jos käyttökelpoinen taajuusalue ulottuisi vielä tätäkin korkeammalle. Huolimattomat komponenttivalinnat esimerkiksi antennin sovituksissa johtavat hyvin todennäköisesti epäsovitukseen ja laskevat linkin budjettia tuntuvasti. Lisäksi ne saattavat suodattaa huonosti esimerkiksi harmonisia yliaaltoja tai muita ei-toivottuja RF-signaalin osia, jolloin laite ei läpäise sille harmonisoiduilla standardeilla asetettuja vaatimuksia. Myös suodatuskomponentit radion käyttöjännitteillä ovat kriittisiä, jotta laite ei synnytä häiriöitä läheteeseen tai häiriinny itse vastaanotossa.

RTC kellokide

Kellokiteen valintaan ja kellojärjestelmän toimivuuteen on kiinnitettävä molemmissa laitteissa erityistä huomiota, koska laitteiden välinen liikenne on radioiden protokollassa aikakanavoitu, ja radiot voivat pienen virrankulutusvaatimuksen takia olla aktiivisessa tilassa vain hyvin pienen hetken (ks. ”KEHITETTY PROTOKOLLA CC2500-RADIOILLE” luvussa 3.3). Yksittäiselle paketille sallitaan +/-16 ms poikkeama paketin oletetusta paketin alusta (-suoja-aika/+paketin vastaanottoon kuluva aika), kun se pystytään vielä vastaanottamaan ja myös oletetulla paketin vastaanottohetkellä on

mahdollista sama ajallinen poikkeama. Jos yksittäisen yhteysjakson pituudeksi valitaan 256 s, voidaan kellojärjestelmän vähimmäistarkkudeksi (on likimain sama kuin kiteen tarkkuus) määrätä

$$\frac{\frac{\pm 16\text{ms}}{2}}{256000\text{ms}} = \pm 31,5\text{ppm}$$

Laskussa poikkeama on jaettu kahdella, koska vastaanottavan laitteen ja lähettävän laitteen kellot voivat toleranssien rajoissa ajautua ajallisesti vastakkaisiin suuntiin (tilastollisesti ajatellen tämän pitäisi tosin olla harvinaista, mikä tarkoittaisi että teoriassa voitaisiin sallia suurempikin toleranssi). Edellä laskettuun kiteen tarkkuuteen täytyy sisältyä kiteen lämpötilasta, ikääntymisestä, valmistustoleransseista ja ulkoisista tekijöistä (hajakomponentit, häiriöt, jännitevaihtelu ja niistä seuraava ns. ”pulling”-ilmiö) aiheutuvat ajautumat. Käytettävän kiteen täytyy siis olla varsin tarkka jopa paketin pituisella suoja-ajalla! (Lehto & Räisänen 2006, 169-172.)

Kiinteä sisäinen flash-muisti

MSP430 sisältää oman sisäisen flash-muistin ohjelmointilohkon ja erillisen pienellä lohkokoolalla olevan data-alueen (voidaan kirjoittaa vähäiselläkin muistilla koko lohko kerralla), joten sen haihtumatonta muistia käytetään työssä muunmuassa anturiyksikön asetusten tallentamiseen. Sisäinen muisti ei kuitenkaan riitä edes anturiyksikön mittaamuksiksi, joten sen lisäksi tarvitaan erillinen ulkoinen muisti.

Liitännät

Liitännöissä käytetään roiskevedeltä hyvin suojattuja liittimiä ja liitostapoja. kotelosta ulos tuotujen liitännöiden osalta laitteen elektroniikka täytyy suojata staattisilta purkauksilta +/-4 kV tasoon asti (EN55024). Lisäksi mahdollisten pitkien kaapeleiden takia tarvitaan hyvä EMI suojaus hyötysignaalia ja sen muutamaa ensimmäistä harmonia korkeammille taajuuksille. Näin vältetään hyötysignaalin liiallinen vääryminen mutta estetään kuitenkin radiotaajuuksien, eromuotoisten signaalien etenemistä laitteen elektroniikkaan, mikä saattaisi aiheuttaa virhetilanteita korruptoimalla dataa tai kytketyllä radion vastaanottoon tai lähettämiseen intermodulaatio- tai blocking-mekanismeilla (Lehto & Räisänen 2006, 220-227).

Anturit

Lämpötilan karkeaan mittaukseen käytetään MSP430:n sisäistä lämpötila-anturia. Kalibroimallakaan tällä anturilla ei päästä kuin parin asteen tarkkuuteen koko mitattavaksi suunnitellulla lämpötila-alueella, joten varsinaisiin mittauksiin käytetään joko SPI- tai TWI-väyläistä ulkoista lämpötila-anturia tai SHTxx-kosteusanturin sisältämää kalibroitua lämpötila-anturia. MSP430:n sisäistä anturia voitaisiin hyödyntää lähinnä ADC:n omien lämpötilariippuvuuksien kompensoimiseen, sillä antureiden kalibroinnissa anturiyksikkö on oletettavasti huoneenlämmössä, ja kuitenkin ADC:n lämpötila-käyttäytyminen täytyy karakterisoida ja kompensoida mittauksessa. Tämä ei kuitenkaan sisälly työhön tässä vaiheessa.

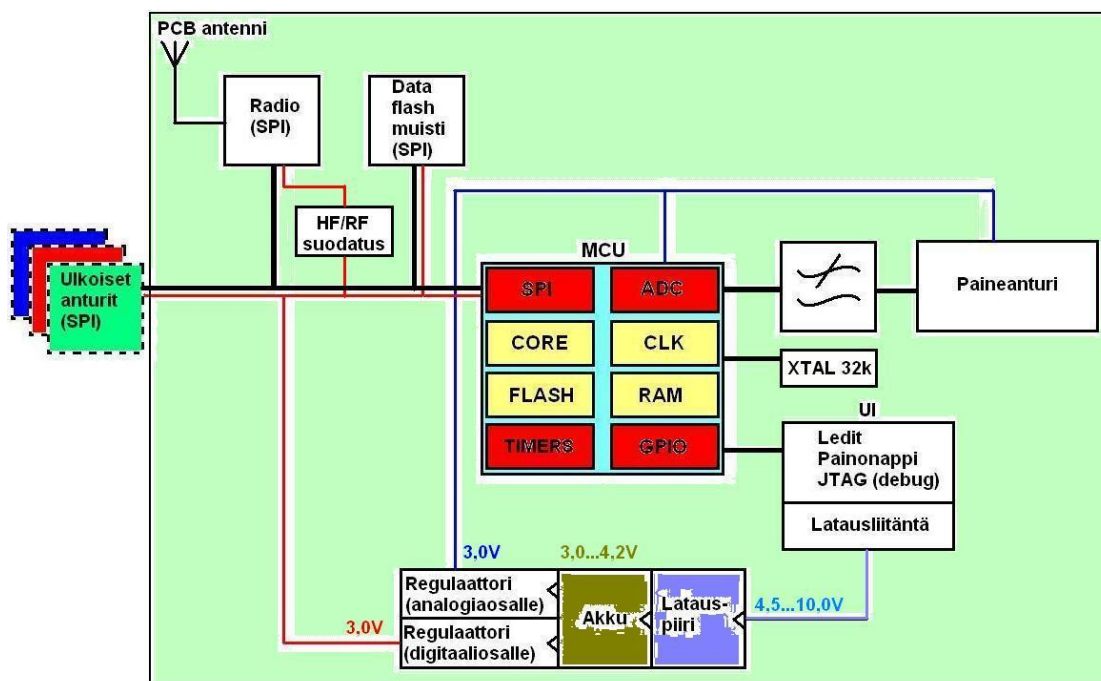
2.2 Anturiyksikön suunnittelu

Suunnittelua rajaavat tekijät

Koko anturiyksikön virrankulutuksen olisi myös hyvä olla keskimäärin noin 200...400 μA :n luokkaa, jolloin 1000 mAh:n paristolla tai akulla (itsepurkautuminen huomioon) päästäisiin jopa puolen vuoden toiminta-aikoihin. Mikro-ohjaimesta ja muista käytettävistä piireistä täytyy siis löytyä myös virransäästöominaisuudet. Hinta on anturien paljouden takia myös kriittinen tekijä. Myös keskeisten komponenttien (prosessori, flash-muisti) saatavuus, testattavuus ja elinkaari täytyy ottaa huomioon.

Lohkokaavio

Anturiyksikkö pyritään tekemään elektroniikaltaan mahdollisimman yksinkertaiseksi ja pelkistetyksi, vaatimusmäärittelyn rajaamin ehdoin. Prosessorin ja siihen integroitujen oheistoimintojen valinnalla voidaan vaikuttaa eniten järjestelmän fyysiseen kokoon ja moduulin valmistuskustannuksiin.



KUVIO 2. Anturiyksikön lohkokaavio. MCU:n oleelliset osat on korostettu.

Prosessori ja ADC

Anturiyksikön prosessoriksi sopii melko kevyt ja mielellään vähän tilaa vievä mikro ohjain, koska haihtuvan ja haihtumattoman muistin tarve on pieni (poislukien mittausmuisti, joka ei tätä työtä sisältyessä voinut sisältyä yhteenkään kohtuuhintaiseen käytettävissä olevaan mikro-ohjaimeen).

Jotta AD-muuntimella kyetään mittaamaan lämpötilaa vaatimusmäärittelyn edellyttämällä 170 asteen skaalalla vähintään 0,1 asteen tarkkuudella, AD muuntimen kohinavapaan resoluution on oltava vähintään

$$2^{x-1} > \frac{170^{\circ}\text{C}}{0,1^{\circ}\text{C}} \Rightarrow \text{int}(x) + 1 = 11 \text{ bit}$$

Käytännön syistä kohinavapaa resoluutio yritetään saada vähintään yhden bitin tätä paremmaksi, jotta ei tarvita keskiarvoistamista ja sisääntulossa mahdollistetaan skaalan nähden 50 % suuruinen offset-jännite. AD-muuntimen täytyy kyetä mittaamaan myös negatiivista jännitettä paineanturien tapauksessa (esitutkimuksen perusteella paineanturilla tullaan käyttämään tietyn tyyppistä mittasiltaa), jolloin differentiaali-

sen anturin tapauksessa mitattavalle jännitteelle on sallittu myös vastakkainen polariteetti, jolloin yksi bitti kuluu mittausdatassa polariteettibittinä.

AD-muuntimen lineaarisuuden ja offset-virheen tulisi ainakin lämpötilan suhteen olla jo oletuksena niin hyvä, ettei se haittaa mittauksen minimi tarkkuutta. Tällöin ei välttämättä tarvitsisi tehdä valmiin laitteen kalibrointia useammassa kuin yhdessä lämpötilassa. Näyttäisi siltä että pieniä mittauskohinoita saavutetaan erityisesti edullisilla ja hitaahkoilla delta-sigma-tyyppisillä AD-muuntimilla. Muunnosaika on lähes kaikissa muuntimissa suhteellisesta hitaudesta huolimatta sovelluksen kannalta merkityksellisen pieni. Tällainen AD-muunin sisältyy myös useisiin muihin MSP430-proessoreihin, ja se oli anturiyksikön prosessorin valinnassa merkittävä tekijä. Työhön alittu mikro-ohjain MSP430F427 sisältää AD-muuntimen.

Akku, latauspiiri ja regulaattorit

Virtalähteeksi valittiin kolmella AAA-kokoisella NiMH-akulla toteutettu kennosto (nimelliskapasiteetti 3,6 V), josta käytetään virtanapin signaalointiin myös reguloimaton kahden kennon välijännite. Kennoston kapasiteetti on nykyisillä NiMH kennoilla 700...1000 mAh:n luokkaa, mutta erityisesti suurempikapasiteettisilla kennoilla itsepurkuvirratt ovat niin korkeita että ne kuluttavat enemmän virtaa itse kuin mitä laite kuluttaisi. Tämän takia laitteeseen etsittiin kenno jolla on erittäin matala itsepurkuvirta, vaikkakin vaatimattomammalla 700 mAh nimelliskapasiteetilla. Esitutkimusten perusteella akut pitäisi valitulla LDO-tyyppisellä 3 V:n lineaariregulaattorilla pystyä purkamaan varsin tyhjiksi, ennen kuin jännite putoaa liian alas (lähes kokonaan purkautuneena useilla akuilla jännite noin 1 V/kenno). Akkukennojen lataamiseen soveltuva edullinen piiri löytyi Linear technology:lta, ja myös se integroitiin levyille. Akun varaustilan aistimiseen käytetään MSP430:llä olevaa käyttöjännitteen mittaussytkettä, jolla estetään NiMH-akuille vahingollinen ylipurkautuminen.

Pääkäyttöjännitteen regulaattorin nimellinen ulostulovirta on 100 mA: mikä riittää hyvin radiolle ja flash-muistipiirille. Levyllä on myös toinen samanlainen, erillinen regulaattori analogisille antureille ja SD-ADC:lle. Valittu regulaattori on matalakohinainen (low-noise), jotta analogisten anturien mittaukset olisivat mahdollisimman tarkkoja. Toisen regulaattorin etu on myös siinä, ettei tarvita erillistä puolijohdekyt-

kintä kytkemään antureiden mittasiltoihin virtaa ja jännite on vakaampi (isolaatio, PSRR). Regulaattorin valinnassa tärkeitä kriteereitä olivat matala joutokäyntivirta (quiescent current), matala dropout noin 50 mA virralla, positiivinen ENABLE-pinni ja pieni oheiskomponenttien tarve.

Käyttöliittymä

Akun varauksen ja latauksen tilaa indikoi 2 lediä, joita ohjaa laturipiiri. Kolmas ledi käytettiin yleikäyttöisenä debug- ja tilaindikaattorina. Kaikki ledit tuodaan kotelon pintaan levyille tai koteloon asennettavilla valojohteilla. Laitetta voidaan hallita paikallisesti yhdellä ainoalla napilla (ks. luku 3.4, kytkimen tilakone). Ratkaisu on riittävä, edullinen ja kotelosta on helppoa tehdä tiivis. Koska laitteen virran kytkentä tehdään hetkellisen painonapin kautta OR-portin avulla, jolloin

- Saadaan kompakti kasaus
- ei tarvita liukukytkeä, jonka kotelosta ulos tuotavat kontaktit voisivat helposti hapettua tai kulua ja aiheuttaa epäluotettavuutta
- mahdollistetaan virranhallinta mikro-ohjaimella (viiveet, jännitteiden valvonta, ohjelmallinen sammutus)
- viiveillä hallittava varmuus kytkimen tarkoituksellisesta painamisesta esim. idusoituneiden häiriöiden tapauksessa

Mikro-ohjaimelle kytketään napin tilan valvontapinni (IN), ja regulaattorin ohjauspinni (OUT). Jotta kytkentä toimii, täytyy kytkentään ottaa akun jännite (2 kennon jännite täydestä kolmen kennon jännitteestä, jotta logiikka toimii kaikilla akun varaustiloilla). Samalla täytyy kuitenkin huolehtia, ettei jännite valvontapinnillä ylitä jännitettä $V_{CC}+0,3\text{ V}$. Tämä toteutetaan asettamalla pinnille RC-viivepiiri. Kun virtanappia painetaan, regulaattorilta kestää noin 50 μs stabiloitua ja käynnistyä, minkä aikana ja jälkeen se lataa myös pienen impedanssin kautta puskurikondensaattorit, ja MCU saa täyden käyttöjännitteensä. RC-piirin viiveen täytyy siis olla riittävä siten että sen jännite nousee hieman hitaammin kuin puskurikondensaattorien viivästämä käyttöjännite. Tähän arvioidaan riittäväksi jo 10...50 μs viive, joka saadaan valitsemalla 1 k Ω vastus ja laskemalla sen pariksi kondensaattori

$$\tau = 10 * 10^{-6} s = RC$$

$$C = \frac{10 * 10^{-6} s}{1000 \Omega} = 10 nF$$

Edellä mainittu pinnin maksimijännitteen raja voidaan luultavasti ylittää, jos huolehditaan että pinnille tuleva virta ei voi olla suuri. Tätä ei kuitenkaan suoraan mainita missään piirin spesifikaatioissa, joten mahdollisuus viivepiirin lisäämiseksi täytyy olla levyllä.

Kytkenän toimitaperiaate on seuraava:

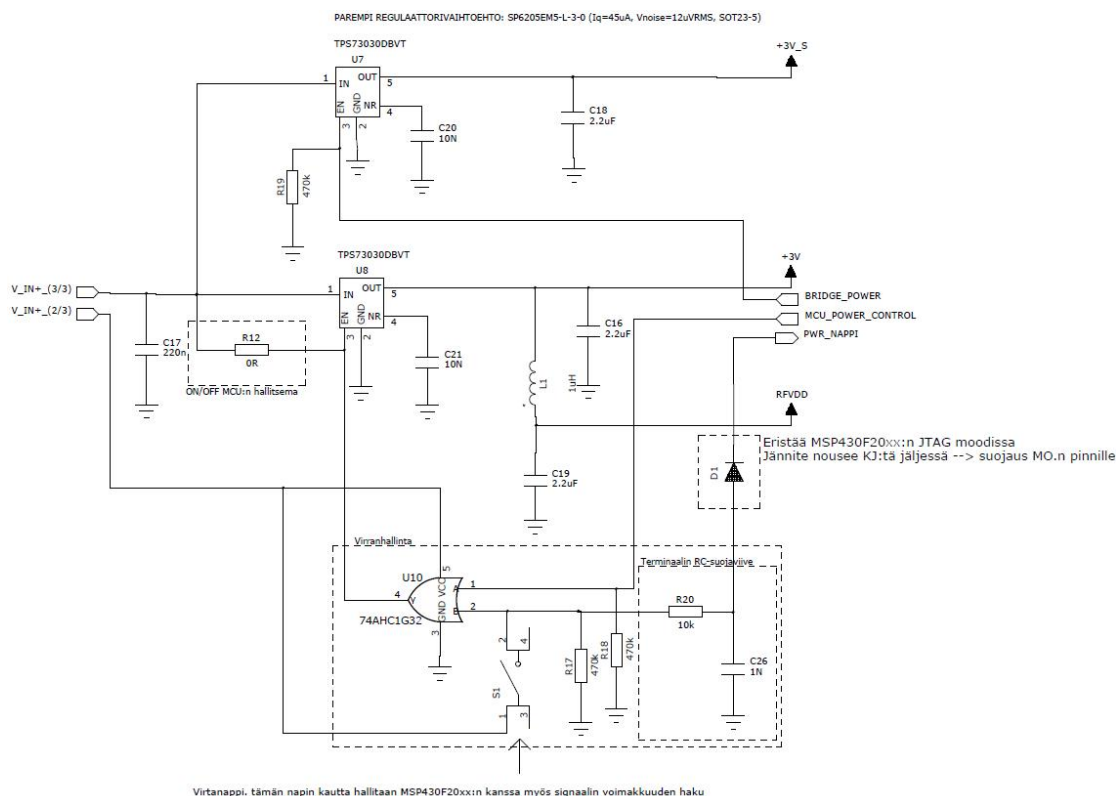
- Käynnistys:
 1. Laite on OFF-tilassa
 2. Nappia painetaan. Or portin sisääntulossa on välittömästi 1-tila, jolloin sen ulostulo menee positiiviseksi. 2 kennon jännite on kennojen tyhjäksi purkamiseen asti riittävä tuomaan riittävän jännitteen OR-portille ja lopulta enable-pinnille. Edellä kuvattu tapahtuu mikrosekutien viiveellä. Samalla kun nappia painetaan, alkaa RC-piirin kondensaattorin (MCU:n aistintapinnin) jännite hiljaa nousta.
 3. Regulaattorin ulostulo alkaa nopeasti nousta ja ladata puskurikondensattoreita, RC-piirin jännite nousee tasaisesti hieman käyttöjännitettä jäljessä.
 4. Regulaattorin ulostulo saavuttaa regulointijännitteen ja voi mahdollisesti hieman värähdellä. Jännite aistintapinnillä kasvaa edelleen. Mikro-ohjaimen ohjelmansuoritus käynnistyy muutamassa mikrosekunnissa.
 5. Ohjelma alkaa laskea kuinka kauan nappia painetaan (aistintapinnillä on jännite), ja kun tietty raja-arvo on ylitetty, mikro-ohjain ohjaa myös OR portin toiseen tulon ylätilaan. Ohjaava jännite on riittävä, eikä ylitä maksimiarvoa. Regulaattori on nyt mikro-ohjaimen hallinnassa, ON -tilassa.
 6. Jännite regulaattorilla stabiloituu ja aistintaelimellä on täysi 2 kennon jännite, mikä ei ylitä pinnille tuotavan jännitteen maksimiarvoa.
- Sammutus:
 1. Laite on ON-tilassa
 2. Nappia painetaan. Aistintapinnin jännite alkaa hiljaa kasvaa, kunnes saavuttaa kynnyksarvonsa. Mikro-ohjain käynnistää pinnille assosioituneen keskeytysaliohjelman, joka alkaa laskea kuinka kauan kytkintä painetaan. Jos

raja-arvo ylitetään, käynnistyy sammutusprosessi. Muutoin laskuri nollataan ja aliohjelma menee lyhyeen viivetilaan, jonka aikana pinnille kytketty kondensaattori osin purkautuu.

3. Sammutusprosessin käynnistyessä odotetaan että kytkintä lakataan painamasta, jonka jälkeen pidetään pieni viive, jonka aikana aistintapinnille kytketty kondensaattori osin purkautuu.
4. Mikro-ohjain laskee OR-porttia ohjaavan pinnin alatilaa ja regulaattori menee OFF-tilaan. Ohjelman suorittaminen pysäytetään.
5. Piiri toimii vielä hetken puskurikondensaattorin jännitteellä, jonka jälkeen se sammuu. Uusi käynnistysyritys lataa puskurikondensaattorin jälleen aistintapinnin RC-piirin kondensaattoria nopeammin, eikä sille sallittua jännitettä ylitetä.

Vaihtoehtoisesti mikro-ohjain voi nappia painettaessa sammuttaa kaikki oheislaitteet, ja asettaa itsensä pienikulutuksiseen tilaan, jossa se huomaa vain aistintapinnille tuotavan ulkoisen keskeytyssignaalin. Tämä vaihtoehto ei tarvitse kytkimen lisäksi muita komponentteja. Kuitenkin oheislaitteet ja pääkäyttöjännitteen regulaattori kuluttavat joutokäntitilassa virtaa (yhteensä noin 170 μ A), ja mikäli regulaattori joudutaan syystä tai toisesta vaihtamaan valitusta suuremman joutokulutuksen omaavaan malliin, täytyy levyllä olla mahdollisuus käyttää myös aitoa virran katkaisua (regulaattori OFF-tilaan jolloin virta lähelle 0 μ A). (MSP430F42x Mixed Signal Controller 2007, 17; MSP430x4xx Family User's guide 2010, 11-5.)

Ohjauskykentä esitetään kuviossa 3. +3V_S on analogiaosan- ja +3V digitaaliosan käyttöjännite. RFVDD on suodatettu käyttöjännite radiolle. Lohkon jännitesyöttöinä V_IN+_(2/3) on kahden NiMH akun jännite ja V_IN+_(3/3) akkukennoston täysi jännite.



KUVIO 3. Virtanapin ja UI:n ohjauskytkentä suojausineen.

Kosteusanturi

Kosteusanturiksi sopiva anturi löytyi Sensorionilta. SHTxx-sarjan anturit ovat todella pienikokoisia, valmiiksi kalibroituja ja digitaalisia (TWI-liitäntä). Digitaalisuuden etuna on että vaikka naturi on verraten kallis, se voidaan liittää anturiyksikköön tarvittaessa liittimen ja johdon välityksellä, eli se voidaan jättää pois niistä laitteista joilla ei tarvitse mitata kosteutta. Pienen kokonsa ja vähäisen oheiskomponenttien tarpeen vuoksi anturista voidaan tehdä todella pieni, mikä on välttämätöntä esimerkiksi betonin kosteutta ontelomittauksella mitattaessa. Anturi on myös riittävän tarkka suhteellisen kosteuden osalta, ja siihen sisältyy tarkka lämpötila-anturi. Laitteeseen tulee siis myös oheistoimintona lämpötilan mittaus ominaisuus. Koska anturia käytetään mahdollisesti pitkänkin johdon päässä, täytyy heijastusten välttämiseksi välijohdon impedanssin olla hallittu. Isäntälaitte (mikro-ohjain) hallitsee TWI-liitännän kellon, joten anturiyksikön puolelle tulee lähdön impedanssin sovitettava sarjavastus, ja anturin puolelle imupiiri rinnakkaisterminoinniksi (pieni virrankulutus verrattuna resistiiviseen terminointiin). Datalinja terminoidaan molemmista päistä sarjavastuksella, pyrkien terminoimaan vastaanottavasta päästä kerran heijastunut pulssi lähettävässä päässä. Vastaanottava pää tehdään siis molemmissa korkea-impedanssiseksi. Tämä

ei ole ongelma, koska vakaalla kellolla dataa voidaan syöttää kuinka hitaasti tahansa, joten mielivaltaisenkin pitkällä johdolla voidaan huolehtia että heijastunut pulssi saadaan terminoitua. Lisäämällä anturin ohjelmaan keveitä digitaalisia tunnistusmekanismeja (esimerkiksi tunnisterekisterin luku) voidaan käyttää myös muita TWI-liitäntäisiä antureita.

Paineanturit ja kalibrointi

Levyllä tulee sekä monikäyttöinen differentiaalinen (kaksiporttinen) paineanturi, että absoluuttinen paineanturi (yksiporttinen sisäisellä, tai haluttaessa ulkoisella referenssillä). Sovellus ja kalibrointitarkkuus huomioonottaen differentiaalinen anturi on näistä huomattavasti käytännöllisempi, koska ilman painetta tai virtauksia ei voida tarkasti mitata absoluuttianturiverkolla. Lisäksi se on absoluuttisiin referenssin sisältäviin antureihin verraten ymmärrettävästi halvempi: Anturiin ei tarvitse valmistaa sisäistä tyhjiötä tai muuta tarkkaa ja vakaata referenssipainetta. Virtausten mittaaminen absoluuttiantureilla edellyttäisi paitsi virtauskanavien (ympäristön) tuntemista, myös äärimmäisen tarkkaa kalibrointia ja kompensointia esimerkiksi anturin lämpötilan, ikääntymisen ja hystereesin suhteen. Pitkän aikavälin käytössä tämä olisi ymmärrettävästi erittäin haastavaa, ja riittävällä tarkkudella lähes mahdotonta.

Absoluuttiset anturit mittaavat niiden mittausporttiin tuotua painetta joko sisäiseen (usein tyhjiö) tai ulkoiseen (ympäröivä ilmakehä) referenssiin. Koska anturit kalibroidaan, ja koska parametreiltaan tunnettujen kanavien virtausmittaus hoidetaan differentiaalisella anturilla, oletetaan työssä että sisäisellä referenssillä varustettu anturi on käytännöllisempi. Ulkoista referenssiä käyttävä anturi myös hankaloittaisi huomattavasti täysin tiiviin kotelon käyttöä, koska ympäröivä ilmakehä olisi tuotava anturin ympärille. Absoluuttiseksi paineanturiksi sopii hyvin Feescale Semiconductorin valmistama kapasitiivinen paineanturi MPXM2202

- Absoluuttisen paineen mittausalue 0...200 kPa. keskimääräinen mitattava paine juuri puolessa välissä anturin koko mitta-aluetta, eli juuri 100 kPa:n kohdalla, jota luokkaa normaali ilmakehän ilmanpaineikin on. Mittauksen kannalta on hyvä, ettei tarvitse käyttää anturin äärialueita.
- Lämpötilakompensointi on integroitu.
- Valmiiksi kalibroitu

- Edullinen
- Pintaliitettävässä piirikotelossa
- Sisäinen tyhjiö sisältyy piiriin (todellinen absoluuttimittaus mahdollinen)
- Virrankulutus noin 6 mA @10 V
- Käyttölämpötila-alue -40...+125°C

Anturi voidaan kytkeä levyille samoihin kytkentöihin joissa käytetään differentiaalista paineanturia, koska mittasilta on samankaltainen. Anturit ovat suurikokoisia, mutta koska niitä ei käytetä yhtäaikaaisesti, voidaan ne sijoittaa levyllä samalle yhteiselle pinta-alalle.

Tehtäessä differentiaalisella paineanturilla mittausta esimerkiksi ilmastointikanavasta, ilman pyörteily ja paineenvaihtelut saattavat tehdä mittauksen mahdottomaksi. Tätä voidaan minimoida asettamalla paineanturin tuloportteihin paineentasaus (shunt). Haittapuolena vasteaika nousee, koska shuntin takainen tila tasaantuu ulkoiseen paineeseen hitaasti, mutta tämä on sovellusta ajatellen merkityksetöntä. Pyörteilyä voidaan välttää myös tekemällä mittaukset etäällä puhallinlaitteista, putkien mutkista, koonmuutoksista, säätöpelleistä, venttiileistä, toimilaitteista ynnä muista kanavan epäjatkuvuuskohdista. Mittaus voidaan tehdä myös useampana eri ajanhetkenä ja tulokset voidaan keskiarvoistaa.

Oleellisia rajoitteita anturin tarkkuuteen aiheuttavat anturien

- lämpötilasta aiheutuvat virheet
 - Elementtien resistanssien ja materiaalin kimmoisuuden muutokset
 - Voidaan kompensoida erillisellä lämpötila-anturilla ja korjausparametrit sisältävällä LUT:lla (Look-Up-Table)
- offset-virhe
 - Anturielementistä ja sen mahdollisesta elektroniikasta tulee tasajänniteulostulo. Esimerkiksi pietsoresistiivisen (venymäliuskaan perustuvan) anturin mittasillassa olevien vastusten valmistustoleransseista johtuvat erot ajavat ulostulon epätasapainoon.

- Voidaan kompensoida ohjelmallisesti vähentämällä mitattu ja tunnettu offset saadusta arvosta. Samalla voidaan kompensoida koko kytkennän offset.
- lineaarisuusvirhe
 - Aiheutuu anturielementtien materiaalien epäideaalisuuksista ja muotoilusta
 - Voidaan kompensoida LUT:lla katsomalla anturin lukemaa vastaava paine taulukosta. Taulukko saadaan joko mittaamalla se kalibroinnin yhteydessä (täydellinen paineskaala) tai data voidaan saada mahdollisesti suoraan valmistajalta. Tämä on kuitenkin kallista
 - Helpompi kompensoida esimerkiksi kolmen tai useamman pisteen kalibroinnilla ja interpoloimalla kalibrointipisteiden välit.
- hystereesivirhe
 - Anturin materiaaleihin jää painerasituksen seurauksena jännityksiä, eikä anturielementti täysin palaudu alkuperäiseen muotoonsa.
 - Hankala kompensoida. Voidaan käyttää esimerkiksi anturille ilmoitettua hystereesidataa ja tietoa edellisistä mittausarvoista virheen arviointiin ja korjaukseen
- skaalan keskinäinen vaihtelu
- ikääntyminen ja fyysiset muutokset.

Differentiaaliseksi paineanturiksi valitaan All sensors 4INCH-D-4V, joka on herkkyydeltään hintaan nähden erinomainen. Myös tämä anturi on lämpötilakompensoitu. Koska molemmat anturit ovat lämpötilakompensoituja, päästään kohtuulliseen tarkkuuteen kun molemmille valituille antureille kalibroidaan paine. 4INCH-D-4V:n datalehden perusteella kokonaisvirhe ilman offset-virhettä ja skaalan (span) virhettä on alle $\pm 2,25\%$. Tähän täytyy tietysti vielä summata merkittävimpinä AD-muuntimen lämpötilasta johtuvat virheet, referenssijännitteen virheet, sekä mittasillan käyttöjännitteen virheet. Mittasillan käyttöjännitteenä, ja ADC:n referenssijännitteen lähteenä käytetään jännitteenjakajan avulla samaa analogiselle osalle varattua jännitettä (matalampaa tasoa), ja koska sen jännitteen muutos on suhteessa sama sekä referenssille että mittasillalle, virheet kumoavat toisensa. Paitsi että näin minimoituvat käyttöjännitteen vaihtelun aiheuttamat mittausvirheet, voidaan näin myös saavuttaa

kohtuullinen tarkkuus silloin kun analogiaosan regulaattori ei enää kykene reguloimaan alle 3V jännitettä toimittaessa lähes tyhjällä akulla. ADC:n ja anturin yhteiset ja merkittävämmät skaalan virhe sekä offset-virhe voidaan kalibroida. Kalibrointi tehdään tuomalla anturille tarkka ulkoinen painereferenssi kolmella eri paineella: Anturin differentiaalisessa minimipaineessa, ilman ulkoista referenssiä (=0 Pa. Kytkenän offset-jännite voidaan mitata tässä, ja ottaa se huomioon mittauksissa) ja anturin differentiaalisessa maksimipaineessa. Mittaustuloksista ja ilmoitetuista paineen arvoista lasketaan mittaukselle kulmakerroin ja ilman referenssiä mitatun kohdan lukema (offset) voidaan vähentää mittaustuloksesta. Jäljelle jää siis merkittävimpänä enää ADC:n lämpötilasta johtuva virhe (offset), joka on suunnitelluissa olosuhteissa maksimissaan 0,1 % mittaustuloksesta. Jotta vaatimusmäärittelyssä asetettuun tavoitteeseen päästäisiin, täytyy paineen kalibroinnin tarkkuus olla edellä kerrotun perusteella vähintään

$$5\% - 2,25\% - 0,1\% = 2,65\%$$

Tämä vaikuttaa kohtuullisesti saavutettavissa olevalta kalibrointitarkkuudelta. Todellisuudessa yhdistetylle mittaushajonnalle riittäisi pienempikin tarkkuus, sillä virheet osin kompensoivat toisiaan todennäköisemmin kuin että kaikkien hajonta olisi ääri-laidassa ja vaikuttaisi mittaustuloksessa samaan suuntaan. Kalibrointitermeistä lasketaan mittaukselle korjaustermit, jotka tallennetaan anturiyksikön haihtumattomaan flash-muistiin. Koska kalibrointirutiini voi olla molemmille antureille samanlainen, anturin tyyppiä ei tarvitse erikseen huomioida ohjelmassa. (MSP430F42x Mixed Signal Controller 2007, 17; 4 Inch Water Pressure Sensors, rev. A; 200 kPa On-Chip Temperature Compensated Silicon Pressure Sensors 2012.)

ADC:n skaalan mitoitus

Anturin differentiaalinen lähtö suodatetaan asettamalla sen lähtöjen välille kondensaattori. tämä kondensaattori synnyttää RC-piirin, jonka aikavakio aiheuttaa mitattaessa jännitteen nousulle viiveen. Rajataajuudeksi valitaan 10 Hz. Jottei ADC:n näyttestys vaikuta liikaa mittaukseen, mitattava tasajännite puskuroidaan suureholla kondensaattorilla, joka toimii myös RC-suotimen kondensaattorina. RC-suotimen

vastukseksi tulee sillan lähteen kanssa sarjassa oleva impedanssi (29,6 kΩ), joten kondensaattorin kooksi tulee:

$$\frac{1}{2 * \pi * R * f_r} = \frac{1}{2 * \pi * 29,6k\Omega * 10Hz} \approx 538nF \rightarrow 470nF(E12)$$

Samalla piirille tulee aikavakio, joka pitää ottaa huomioon ohjelmistosuunnittelussa. Seitsemän aikavakion kuluttua virran kytkemisestä kondensaattorin jännite on 99,91 % (=36.8^5) jännitteen raja-arvosta. Ennen mittausta täytyy sisääntulojännitteen antaa vakiintua suurin piirtein tälle tasolle, mikä myös kuluttaa jonkin verran virtaa (jännite kytkettynä mittasillalle). Samalla vakiintuvat myös anturi (lämpeneminen), regulaattori ja referenssi (referenssille tehty lähes sama aikavakio). Vaadittu asettumisaika on siis

$$7 * \tau = 7 * R * C = 7 * 29600\Omega * 220 * 10^{-9} F \approx 92ms$$

Anturin ulostulojännite on maksimissaan +/-1000 Pa:lla

$$U_{SPAN} * \frac{U_{DC}}{U_{SPEC}} = \pm 40mV * \frac{3V}{12V} = \pm 10mV$$

missä U_{SPAN} on paineanturin spesifioitu tyypillinen ulostulojännitteen vaihtelu (mitattuna maksimi- ja minimipaineiden alla ulostulojen erotuksena), U_{DC} käyttöjännite ja U_{SPEC} käyttöjännite, jolla U_{SPAN} on spesifioitu.

Edeltävän perusteella voidaan määrätä vahvistimen jännitevahvistus, kun päätetään myös ADC:n referenssijännitteeksi käyttöjännite U_{DC} vastusjaolla jaettuna ja suodattuna (kohina pois). Kun sekä ADC:n referenssijännite että anturin käyttöjännite ovat suhteessa käyttöjännitteeseen, saavutetaan riippumattomuus käyttöjännitteestä. Käyttöjännitteen madaltuminen pienentää referenssiä ja anturin ulostuloskaalaa, jolloin vakiojännitettä mitattaessa AD-muunnettu jännitearvo pysyy likipitään samana. Piirille tuotavan referenssijännitteen on oltava välillä 1,0...1,5 V 3V:n käyttöjän-

nitteellä. Referenssintulon ottama virta on maksimissaan 50 nA, minkä vuoksi pienivirtaisella vastusjaolla toteutettu referenssi on mahdollinen. Tästä valitaan puoliväli 1,2 V, jolle on tarjolla myös puolijohteilla tehtyjä referenssipiirejä ja vastusjaon virraksi yli 100 kertaaisesti referenssintulon ottama virta. Vastusten summaresitanssista tulee siis luokkaa satoja kilo-ohmeja. Valitaan jännitteen puoleinen vastus $R1=100$ kohm, jolloin

$$U_{ref} = U * \frac{R1}{R1 + R2}$$

$$1,2V = 3,0V * \frac{100k\Omega}{100k\Omega + R2}$$

$$\frac{3V}{1,2V} = 1 + \frac{100k\Omega}{R2}$$

$$\frac{100k\Omega}{\left(\frac{3,0V}{1,2V} - 1\right)} = R2 \approx 6,66k\Omega \Rightarrow 6,65k\Omega(E96)$$

Koska päätetään myös helppokäyttöisyyden vuoksi tehdä anturin kytkentä sellaiseksi, ettei pelkkää virtausmittausta tehtäessä letkujen kytkentäjärjestyksellä ole väliä, tai jos halutaan paineen suuntavektori, täytyy vahvistimen referenssi olla noin puolessa välissä ADC:n referenssijännitettä. Tämä voidaan tehdä myös sisäisesti tekemällä vahvistimen tulo bipolaariseksi (differentiaaliseksi). Etuna on myös että tulon yhteismuotoiset häiriöt vaimenevat. Tällöin voidaan vahvistaa sekä negatiivinen että positiivinen anturin ulostulojännite (vastaten paineen aiheuttamaa differentiaalista painetta). Sisäntulon pitää datalehden mukaan pysyä alueella

$$U_s = \pm \frac{\frac{V_{REF}}{2}}{GAIN} * 0,8 = \pm \frac{\frac{1,2V}{2}}{GAIN} * 0,8 = \pm \frac{480mV}{GAIN},$$

missä GAIN on sisäisen vahvistimen vahvistus. Jos halutaan käyttää paineanturin koko skaala, sisäisen vahvistimen jännitevahvistus tulee siis olla alle

$$A_U = GAIN = \frac{480mV}{U_s} = \frac{480mV}{10mV} = 48$$

Suurin vahvistus joka sisäisellä vahvistimella voidaan saada, on 32-kertainen ja tästä tulee siis lopullinen vahvistus.

Anturin kytkentä ja sen kohina

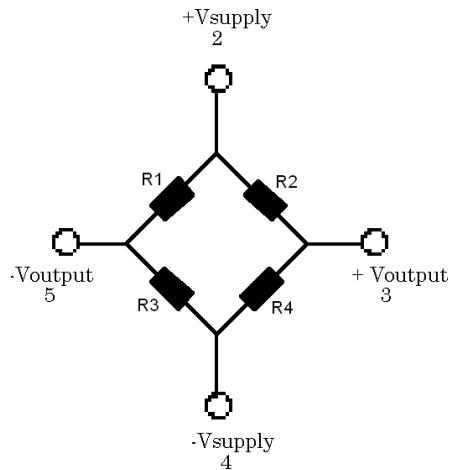
Anturin mittaustarkkuutta rajoittaa kalibroinnin tarkkuuden ja sen mekaanisen tarkkuuden lisäksi elektroniikassa luonnostaan esiintyvä kohina, joka summautuu mittaukseen. Merkittävimpiä luonnollisia kohinoita anturikytkennässä ovat lämpökohina ja $1/f$ -kohina. Kytkentä simuloidaan PSpicella, jonka yhteydessä tehdään kohinatarkastelu, ottaen mukaan anturin (mittasillan) arvioitu kohina. Kohina koostuu pääasiassa lämpökohinasta ja $1/f$ -kohinasta. Kohinoista lämpökohina saadaan suoraan Pspice-ohjelmalla simuloimalla, mutta $1/f$ -kohina täytyy laskea ja mallintaa erikseen. Tämä tehdään laskemalla siltakytkentää (anturia) vastaavan kalvovastuksen aiheuttama kohina ja liittämällä se simulaatioon. Kalvovastuksilla (oletus paineanturin mittasillan vastusten tyypistä) $1/f$ -kohinan laskemista varten tarvittava NI-luku on noin 1 uV/V (arvioitu). Lopuksi kohinat yhdistetään yhdeksi kohinamalliksi, joka vastaa todellista sillan kohinaa. Arvioitaessa kohinaa täytyy ottaa huomioon, että PSpice -simulointiohjelma laskee kohinajännitteen maatasoa vasten. Kytkennät täytyy siis muokata sellaisiksi, että ne vastaavat todellista mallia, mutta huomioivat myös Pspicen rajoitteet.

Vahvistimen kaista rajataan alustavasti ensimmäisen kertaluvun RC-alipäästösuotimella 10 Hz:n . Sillan sisäisestä rakenteesta "low-pressure"-malleilla saadaan valmistajalta selville, että silta koostuu ohutkalvovastuksista (ja joillain lämpötilakompensoidulla malleilla sillan kanssa sarjassa olevasta kompensointivastuksesta). Lisäksi sillasta tiedetään että sen sisääntuloimpedanssi on $15 \text{ k}\Omega$ ja ulostuloimpedanssi $3 \text{ k}\Omega$ (resistiivisiä).

MSP430:n sisältämä 32x vahvistin mallinnetaan ideaalisella vahvistimella, koska sen kohinaan liittyviä parametreja ei ole kerrottu. Näin saadaan tietää kuinka pieniä paineita itse anturilla on mahdollista mitata.

Jotta kohina-analyysi olisi mahdollinen, täytyy anturin sisäinen rakenne tuntea tarkasti. Tiedetään että offset-jännite on tyypillisesti 0 V , ja jotta silta olisi tasapainossa,

täytyy olla $R_1=R_2$ ja $R_3=R_4$. Anturin siltakytkennän vastusten (venymäliuskojen) resistanssit saadaan laskettua ratkaisemalla ne yhtälöparin avulla, kun tunnetaan niiden rinnankytkentöjen resistanssit ($R_{IN} = R_{24} = 15k\Omega$ ja $R_{OUT} = R_{53} = 3k\Omega$). (200 kPa On-Chip Temperature Compensated Silicon Pressure Sensors 2012.)

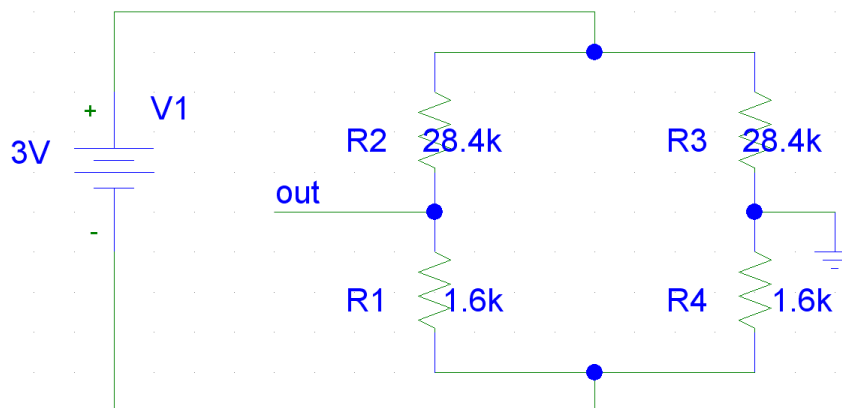


KUVIO 4. Differentiaalisen 4 INCH-D-CGRADE paineanturin anturin mittasilta.

Mittasillan kytkennästä ja tunnetuista impedansseista voidaan laskea sen vastuksille arvot

$$\begin{cases} \frac{(R_1 + R_3) * (R_1 + R_3)}{R_1 + R_3 + R_1 + R_3} = 15k\Omega \\ \frac{(R_1 + R_1) * (R_3 + R_3)}{R_1 + R_1 + R_3 + R_3} = 3k\Omega \end{cases} \rightarrow \begin{cases} R_1 \approx 28,4k\Omega \\ R_3 \approx 1,6k\Omega \end{cases} \text{TAI} \begin{cases} R_3 \approx 28,4k\Omega \\ R_1 \approx 1,6k\Omega \end{cases}$$

Oletetaan että $R_1=R_2= 28\text{ k}\Omega$ ja $R_3=R_4=1,6\text{ k}\Omega$. Sillan lämpökohina saadaan simuloimalla KUVIO 5. **Paineanturin mittasillan ekvivalentti kytkentä.** mukainen kytkentä.



KUVIO 5. Paineanturin mittasillan ekvivalentti kytkentä.

Simuloimalla kytkentä lämpötilassa 40 °C saadaan koko kaistan kohinatasoksi (lämpökohinaksi) noin 7,24 nV/Hz.

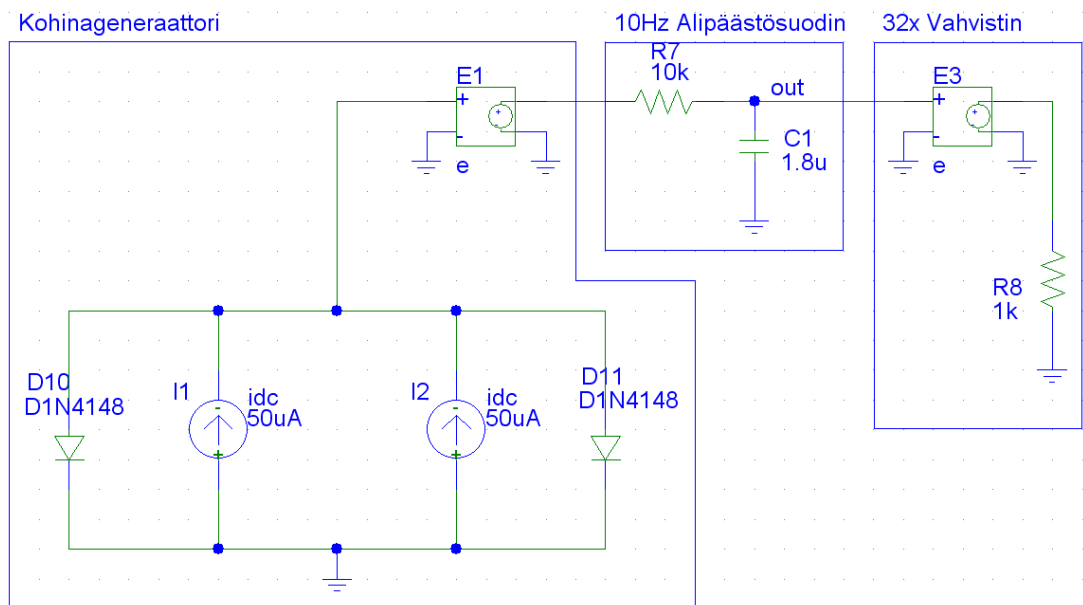
Sillan 1/f-kohina (excess-noise) on kyseisellä anturilla kalvovastuksen luokkaa

$$NI \approx -20dB = \frac{0,1\mu V}{V}$$

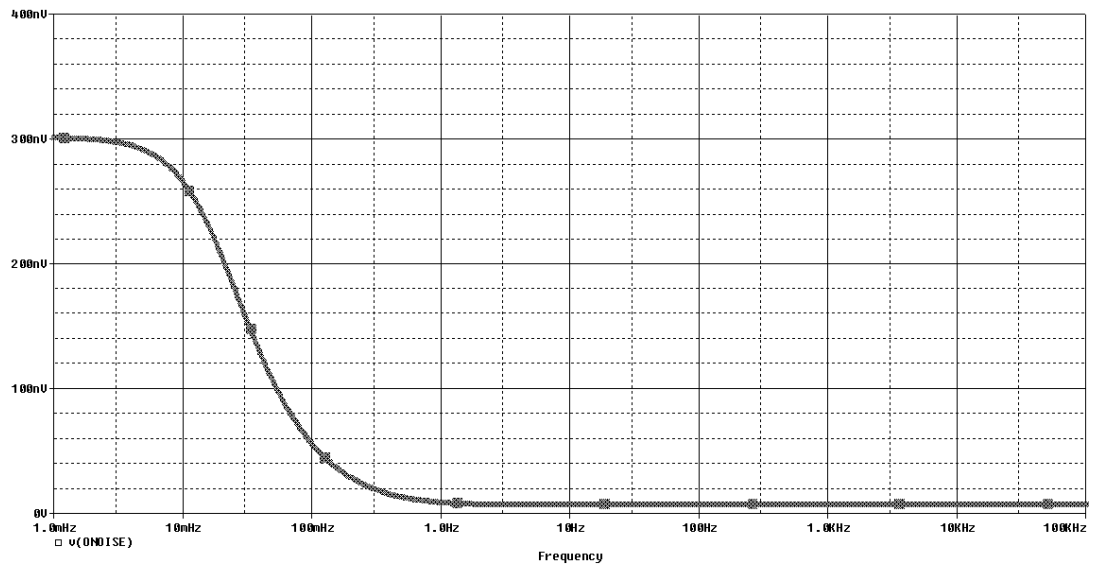
Joten 1/f-kohinan huippuarvoksi tulee

$$\begin{aligned} E_{EX}^2(f) &= 0,659 * NI * V_{DC} \sqrt{\ln\left(\frac{f_2}{f_1}\right)} [\mu V] \\ &= 0,659 * \frac{0,1\mu V}{V} * 5V * \sqrt{\ln\left(\frac{10Hz}{1Hz}\right)} [\mu V] \\ &\approx 300nV \end{aligned}$$

Mittasillan kokonaiskohinan mallinnus tapahtuu luomalla 1/f-kohinan malli, joka luonnostaan sisältävää myös lämpökohinan. Tämän jälkeen lämpökohinan taso asetetaan halutuksi ideaalisen vahvistimen E1 vahvistuksen asettelulla. 1/f-kohinan huipputaso puolestaan haetaan halutuksi säätämällä mallissa olevien vakiovirtalähteiden virtaa. 1/f-kohinan painottuminen arvioidaan hieman alle 1 Hz:n, ja painotus säädetään hakemalla, muokkaamalla diodien mallien kapasitansseja komponenttikirjastoihin. Kuvioissa 6 ja 7 esitetään kohinamalli.



KUVIO 6. 1/f-kohinan malli. Malliin tulee luonnostaan myös lämpökohinaa, jonka taso haetaan ideaalisella vahvistimella E1.



KUVIO 7. Kuvion 6 kytkennän mallinnettu $1/f$ -kohina.

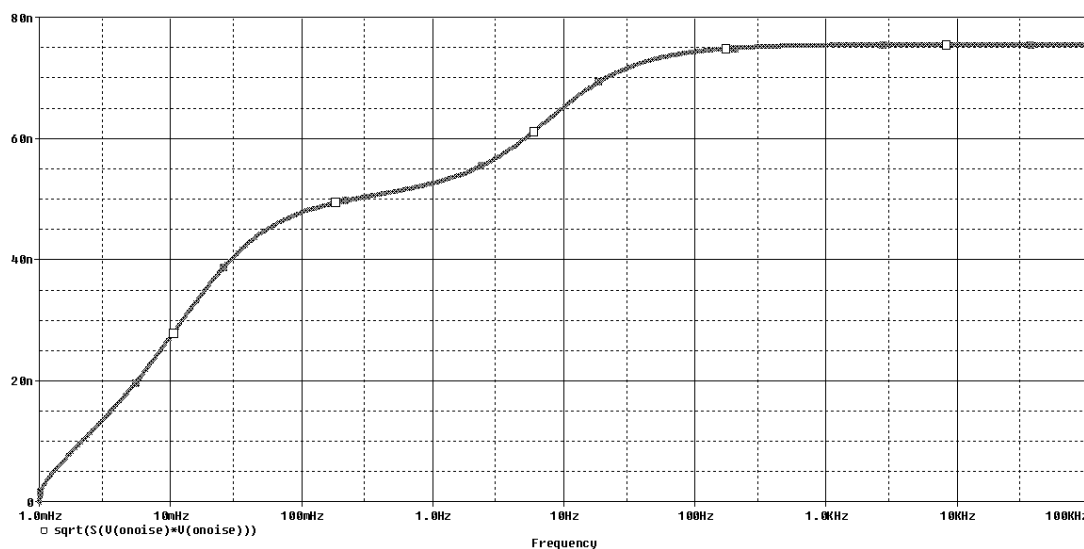
Mallinnettu $1/f$ -kohina painottuu alueelle 1 mHz...1 Hz, huippu on noin 300 nV. Mukana on edellä laskettu pohjakohina (lämpökohina), jonka taso on noin

$$7,24 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$$

. Lopuksi integroidaan tehollinen kohinajännite kohinakaistan yli RC-suotimen jälkeen (huomioidaan vain anturin sisääntulokohina). Pspicessa tämä saadaan kirjoittamalla simuloinnissa traceksi tehollisen kohinajännitteen integraali:

$$\text{SQRT}(S(V(\text{ONoise})*V(\text{ONoise}))).$$

Simuloimalla tämä saadaan kuvion 8 mukainen kokonaiskohina kaistan yli. Suurin osa kohinasta on $1/f$ -kohinan kaistalla.



KUVIO 8. Kytkennän kaistan yli integroitu kokonaiskohina.

Simulointituloksesta saadaan integraalin raja-arvoksi noin 75,5 nV, joka on siis koko kytkennän tehollinen kohinajännite MSP430:n 32x PGA-vahvistimen sisääntulossa. Jos oletetaan vahvistin niin hyväksi että myös sitä käytettäessä kaikki ADC:ltä saatavat bitit ovat kohinattomia, tulee ADC:lle kytkettävästä tehollisesta kohinajännitteestä 32-kertainen ($=2,416 \mu\text{V}$). (200 kPa On-Chip Temperature Compensated Silicon Pressure Sensors 2012.)

ADC:n kohina

Sisäisen operaatiovahvistimen, ja ADC:n ominaisuuksista on kerottu taulukoidusti SINAD parametreilla. Koska mitataan DC-signaalia, tarvitsee vahvistimen ominaisuuksista huomioida vain kohinajännitteet ja -virrat. SINAD-parametrit eivät kuitenkaan kerro mitään kohinasta erikseen, vaan kohinan ja särön yhteismäärästä tietyllä käyttöalueella. Datalehden tarjoamia tietoja ei siis voida käyttää tämän työn edellyttämään lopullisen tarkkuuden estimointiin, vaan täytyy käyttää Muita arviointimenetelmiä.

Tietoa on saatavissa esimerkiksi valmistajan tarjoamista suunnittelu- ja sovellusohjeista. MSP430:n Delta-sigma ADC käyttää hyväkseen ylinäytteistystä ja keskiarvoistamista, jota voidaan vielä viedä pidemmälle ohjelmallisesti ottamalla useita näytteitä ja laskemalla niiden keskiarvo. Koska kohinajännitteen amplitudi noudattaa normaalijakaumaa, saadaan useasta näytteestä keskiarvona todennäköinen mitattu jännite (normaalijakauman huippua vastaava jännite).

Asettamalla sisäisen PGA:n vahvistus 32:ksi 1024:n ylinäytteistysuhteella (näytteet lähes DC:stä), ja lopuksi vielä laskemalla 256 näytteen keskiarvo, saadaan 16-bittisestä AD-muuntimelta (slaa220:n perusteella arvioituna) jo noin 18 merkitsevän bitin tarkkuuksia (mikäli ulkoiset kohinat oletetaan pieniksi). Keskiarvon laskeminen parantaa bittitarkkuutta 0,5 bittiä (tai 3 dB) jokaista näytemäärän kaksinkertaistumis- ta kohden. Tästä voidaan päätellä että esimerkiksi 256 mittauksen keskiarvon vaikutus lopputuloksen tarkkuuteen olisi noin

$$\log_2(256) * 0,5 = \frac{\log_{10}(256)}{\log_{10}(2)} * 0,5 = 4 \text{ bittiä.}$$

Tarkkuus ilman keskiarvoistamista olisi siis sovelluksessa $18-4=14$ bittiä. Sigma-delta tyyppinen muunnin minimoi koko systeemin kohinan vaikutusta. 1,2 V referenssillä voidaan siis mitata arviolta

$$\frac{\left(\frac{1,2V}{2}\right)}{GAIN * 2^{14-1}} \approx 2,29 \mu V \perp$$

jännitteitä, joka siis vastaa mittasillan kohinajännitteen huippuarvoa (oletetulla 99,9 %) PGA-vahvistimen ulostulossa 32x vahvistuksella. Kun halutaan yleisesti digitaalisissa laitteissa käytetty 99,9 % mittaustuloksen varmuus, tämä voidaan kohinan luonteen perusteella saavuttaa niin sanotulla 3,3-sigman säännöllä, jolloin kohinan huippuarvo (p-p) on 6,6-kertainen kohinan RMS-arvoon nähden. Tästä saadaan

$$\frac{S}{N} [dB] = 20 \log \left(\frac{U_S}{E_N} \right) = 20 \log(6,6) \approx 16,4 dB$$

Kohina suhteutetaan teholliseksi kohinaksi, ja olettaen että datalehdellä annettu 14 bitin (13+1bit) tarkkuus on saavutettu tyypillisellä 99,9 % varmuudella (normaalijakauma, 3-sigma), saadaan edelleen RMS-kohinaksi.

$$n_O = \frac{E_{N(P-P)}}{6,6} = \frac{2,29 \mu V}{6,6} \approx 347 nV \perp$$

Todellinen sisääntulon jännitekohina on tietenkin paljon tätä suurempi, mutta arvo vastaa delta sigma muuntimella keskiarvoistamalla saatua sisääntulon vertaiskohinaa, joka huomioi myös ADC:n kvantisointikohinan. Edelläoleva kohina-analyysi on arvioiva. Todellista kohinaa on erittäin hankalaa varmentaa muutoin kuin testaamalla. (Cherry, James A. 1999, 39; MSP430F42x Single-Chip Weight Scale 2004, 2.)

Paineanturin mittauksen kokonaiskohina

Kun summataan sisääntulon kohinalähteet (anturin kohina ja ADC:n sisääntulon vertaiskohina) olettaen ne sarjaan kytketyiksi, saadaan ADC:n sisääntulon kokonaiskohinajännitteeksi

$$e_{RMS} = \sqrt{(347nV)^2 + (2416nV)^2} \approx 2,440uV \perp$$

Tämän perusteella pienimmäksi 99,9 % varmuudella mitattavissa olevaksi jännitteeksi PGA:n sisääntulossa saadaan

$$U_s = \frac{6,6 * e_{RMS}}{GAIN} = \frac{6,6 * 2,44\mu V}{32} = 0,5\mu V$$

Edellä laskettua jännitettä vastaava paine Pascaleina puolestaan olisi

$$\begin{aligned} P[Pa] &= \frac{U_s}{(U_{SPAN} / p["H_2O"] * 248,9Pa/"H_2O))} \\ &= \frac{0,5\mu V}{(10000uV / (4" H_2O * 248,9Pa/"H_2O))} \\ &\approx 0,05Pa, \end{aligned}$$

missä U_s on pienin mitattavissa oleva signaalijännite, p on spesifioitu paine ulostulojännitteen vaihtelualueelle ja $248.9Pa/"H_2O$ muuntokerroin paineelle vesituuman ja Pascalin välillä. Resoluutiota voidaan tästä edelleen parantaa keskiarvoistamalla, kuten edellä on todettu. Paineen mittauksen pitäisi siis näin tarkasteltuna olla mahdollista helpostikin vaatimusmäärittelyssä vaadittavalla 5 % absoluuttisella tarkkuudella

koko skaalan suhteen. On tosin huomioitava että arvioinnissa on oletettu monta asiaa, eikä malli huomioi sähköisesti, magneettisesti tai sähkömagneettisesti ympäristöstä indusoituvia häiriöitä. Vain prototyyppiä testaamalla voidaan varmistaa lopullinen tarkkuus ja mahdollinen ulkoisen vahvistimen tai ADC:n tarve. (Designing with the MPC3551 Delta-Sigma ADC 2005)

Erillinen debug-liitäntä

Debug liitäntä jäi pois vaatimusmäärittelyvaiheessa, joten sitä ei otettu myöskään protoon. Tosin RS-232-pohjainen sarjaliitäntä olisi tulevissa protoissa hyvä olla lisätynä. Tämä voidaan implementoida mikro-ohjaimen vapaaseen USART-liitäntään.

Mittaumuisti

Mittausmuistiksi valittiin ulkoinen, SPI-väyläinen ja fyysisesti pienikokoinen 4 Mbit flash muistipiiri (Atmel dataflash), jossa oli riittävän pieni flashin sivukoko (block size) ja riittävä RAM-puskuri- tai välimuisti. Pieni sivukoko on oleellinen siksi, että haihtuva välimuistisivu voidaan tallentaa usein haihtumattomaan flash-muistiin, ja toisaalta myös sivujen käsittely on helpompaa mikro-ohjaimen rajallisella RAM-muistilla.

Valittu Atmelin AT45DB flash:

- Käsittää seita muistin kokoja. Valittu muisti 4 Mbit (540,672 kB). Vaatimusmäärittelyn edellyttämä muistin määrä maksimissaan on 691,2 kB, joten 4 Mbit malli riittää mainiosti
- Muistilohkot voidaan kirjoittaa lohko (block), tavu tai bitti kerrallaan
- Kaikissa malleissa sama sivun koko (264 bit) ja täysi keskinäinen yhteensopivuus
- Pinniyhteensopivuus eri muistien välillä
- Muistipiirin WP*-pinni ohjataan mikro-ohjaimen pinnien säästämiseksi kiinteästi ylätilaan.
- Piiri voi ottaa luku- tai kirjoitusoperaatioiden aikana 70...80 mA:n nopean piikkivirran, joten lähelle piiriä laitetaan normaalien bypass kondensaattoreiden lisäksi suurehko puskurikondensaattori.
- SCK- ja CS-pinneille laitetaan mahdollisuus lisätä tarvittaessa terminoinnit.

(Atmel AT45DB081D datasheet 2010, 33)

Piirilevysuunnittelu

Levyllä ei tietoisesti käytetä terminointeja muissa linjoissa kuin TWI-liitännässä ja JTAG-väylässä. SPI on jätetty tarkoituksella terminoimatta lyhyiden vetojen ja sen suhteellisten hitaiden digitaalsignaalien vuoksi. Mahdollisuus implementoida yksipäinen terminointi jälkikäteen (terminointi mikro-ohjaimen päässä) lisätään levyille.

Paitsi piirikaaviotasolla, myös levyllä on ehdottomasti huolehdittava hyvien suunnittelusääntöjen noudattamisesta ja EMC ja EMI näkökohtien huomioimisesta. Analogiaa (erillinen käyttöjännite analogiaosalla) ja ja radion RF-maa erotetaan digitaalista omaksi kaistaleekseen tekemällä kuparointiin raot. Tällä estetään radion vastaanottimen häiriintyminen muun digitaalisen elektroniikan ottamista virtapulssista, jotka ilman rakoa saattaisivat kulkea läheltä radion elektroniikkaa. Vastavasti estetään myös virtapulssien kytkeytyminen radion läheteeseen. Lisäksi RF-osan käyttöjännite ja maataso erotetaan digitaalisesta käyttöjännitteestä sarjaferriitillä ja rinnakkaiskondensaattoreilla, jotka sijoitetaan mahdollisimman lähelle CC2500-piiriä. Tarkoituksena tällä on estää galvaanisesti johtuvien häiriöiden etenemistä radioon.

MCU:n ja flash muistin käyttöjännitteille asetetaan puskurikondensaattorien lisäksi bypass-kondensaattorit lähelle piirejä suodattamaan niiden aiheuttamia häiriöitä ja puskuroimaan nopeita transientteja.

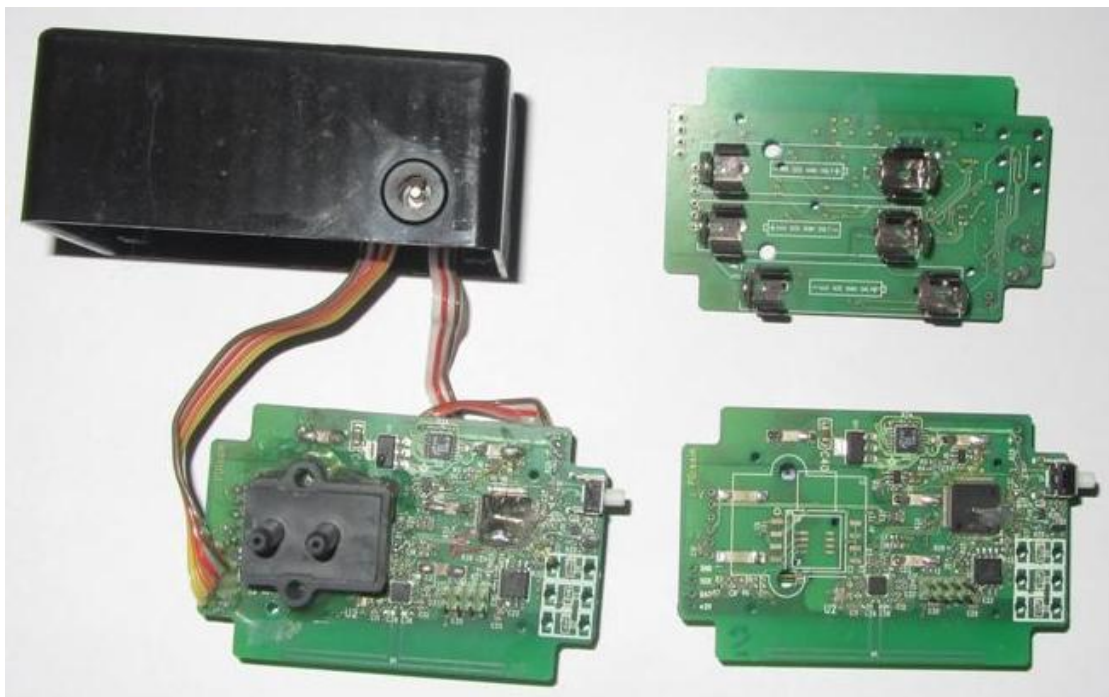
Laskostettu dipoliantenni kopioidaan mahdollisimman tarkasti referenssisuunnittelusta, mukaan lukien sovituksen mikroliuskat ja kondensaattorien paikat, ja se tehdään omaksi komponentiksi. Erittäin oleellinen osa antennia on käytettävän piirilevyn substraatti ja sen kerrospaksuudet, ja mikäli suunnitelma halutaan kopioida muuttamatta sitä, olisi kerrospaksuuksien oltava mahdollisimman lähelle samat kuin referenssisuunnittelussa. Kuparien paksuuden muutokset eivät leveiden avausten vuoksi ole yhtä merkittäviä. Samoin on huolehdittava että kerrosjärjestyksestä tulee referenssisuunnittelun mukainen, jotta syöttö- ja sovituslinjojen impedanssit ovat oikeat. Jotta EN 300 440-standardin edellytykset täyttyvät, referenssisuunnittelussa ehdotetut 2,2 pF:n kondensaattorit on asennettava laskostetun dipoliantennin invertoivaan ja ei-inversoivaan lähtöön. Näiden kondensaattorien tarkoitus on rajata haja-

emissioita, ja niiden valinnassa on oltava huolellinen. Kondensaattorit pudottavat jonkin verran linkin budjettia. Jo antennin referenssisuunnittelun toteuttamiseksi tarvitaan anturiyksikköön nelikerroslevy, mutta tämä on myös minimivaatimus jotta voidaan saada aikaan määritettyjä ja hallittuja väylä- ja liuskaimpedansseja ja näin ennaltaehkäistä emissio ja immunitettiongelmia (ks. loggerilaitteen suunnittelu).

Mittauspiirissä olevat kondensaattorit (erityisesti suuret kapasitanssit) pyritään sijoittamaan lähelle mekaniikan tukipisteitä. Lisäksi keskelle levyä asetetaan ylimääräinen kiinnitysreikä, johon voidaan tarvittaessa lisätä tukielementti. Tämä siksi että keraamiset kondensaattorit ovat alttiita mikrofonii-ilmilölle. Ilmiölssä on kyse mekaanisten värähtelyjen kondensaattorissa aiheuttamasta kapasitanssin vaihtelusta, joka puolestaan voi generoida sovellusta ajatellen suhteellisen suuriakin jännitevaihteluita.

Saatavilla olevat paineanturit muutamien satojen Pascalien luokassa ovat yleensä melko suurikokoisia. Myöskään niiden saatavuus tai vaihdettavuus ei välttämättä ole kovin hyvä. Näiden vuoksi levyllä tehdään mahdollisuus käyttää useampaa saatavilla olevaa, soveltuvaksi katsottavaa paineanturia, ja koska levyllä ei ole tarve käyttää kuin yhtä näistä antureista, ne pyritään sijoittamaan levyllä samaan tilaan oheiskomponentteineen.

Anturiyksikön mekaniikkaa ja PCB näkyy kuviossa 9. Ylhäällä oikealla näkyvät akkukennoston liittimet (kolme AAA-koon akkua) ja alhaalla SMD-kalustettu puoli. Alhaalla vasemmalla suurehko paineanturi on ladottuna ja alhaalla oikealla näkyvät erilaiset paineanturin kalustamisoptiot, joiden ansiosta levyllä voidaan kalustaa kolme eri vaihtoehtoista anturia samalla PWB:n alueella).



KUVIO 9. Anturiyksikön piirilevy ja kotelo.

Kokoaminen ja mekaniikka

Anturiyksikön prototyypin koteloksi valittiin lopullisen tilantarpeen arvioiden perusteella Hammondin valmistama 1591MSFLBK, joka on edullinen ja yleiskäyttöinen valmiskotelo. Kotelon materiaali polystyreeniä joten se ei juuri vaikuta antennin toimintaan tai radiotaajuuksien läpäisyyn. Jotkin kotelomateriaalit saattavat vaimentaa korkeataajuisia radio-aaltoja merkittävästikin, joko absorboimalla tai ollessaan liian lähellä antennia muuttamalla antennin impedanssia. Myöhemmin mahdollisesti tehtävässä moldauksessa on myös huomioitava että piirilevyä ympäröivä massa vaikuttaa sähkökenttiin ja tämän vuoksi antennin ja piirilevylle integroitujen siirrolinjojen ja mikroliuskojen impedansseihin. Tämän vuoksi moldaamalla tehtävän koteloinnin vaikutusta voidaan joutua simuloimaan ja mekaniikkoja/liuskoja iteroimaan useita kirroksia ennen kelvollista lopputulosta. Moldatun yksikön mittaminen tuotekehitystä varten (esimerkiksi liuskojen tai antennin mittaaminen piirikoneella) ei ymmärrettävästi myöskään ole helppoa, joten huomattavasti helpompaa on ensin pyrkiä rakentamaan liuskoista ja antennista simulointimallia ja laskea moldauksen vaikutuksia huolellisesti ennen varsinaisen protoyksikön toteutusta. (RF absorption in different materials 2007.)

AAA-kokoiset akut (pisin komponentti) mahtuvat juuri koteloon poikittaissuunnassa piirilevylle kiinnitettävine liittimineen. Myös muille komponenteille ja antennille jää riittävästi tilaa. Anturi (korkein komponentti) mahtuu koteloon siten, että 1.2mm paksuisella piirilevyllä sen rungon ja kotelon väliin jää noin 3mm tyhjää tilaa, joka voidaan täyttää elastisella massalla. Kotelolla on IP54-kotelointiluokitus: Kotelo on suojattu pölyltä ja kaikista suunnista roiskuvilta vedeltä. Kotelo on musta, joka on epäedullinen väri lämpenemisen kannalta, esimerkiksi sijoitettaessa anturiyksikkö tilaan, jossa aurinko voi päästä paistamaan koteloon. Tämä voi vaikuttaa kotelon lämmönvaihteluun ja mittaustuloksiin. Lisäksi voimakkaat lämmönvaihtelut etenkin ulos sijoitettaessa voivat aiheuttaa kosteuden tiivistymistä koteloon. Laturin virtajohdon liitäntä ja TWI-dataliitäntä (SCK, DATA, +3V, GND) tuodaan ulos kotelosta vesitiiviillä naarasplugilla, ja liittimien ja kotelon välinen sauma suljetaan elastisella massalla tai väliin puristuvalla kumikauluksella. Ulkoiset liitännät tehdään vähintään pölytiiviksi ja vesisuihkun kestäviksi. Painonappi tuodaan pitkävartisella kulmakytkimellä kotelon sivuun ja sen ympärille koteloon jäävä avoin kaulus suljetaan painonapin päälle tulevalla kumisella tarralla. Levyllä olevat 3 lediä kuljetetaan kotelon pintaan koteloon liimatuilla valojohteilla. Valmis prototyyppi mekaniikkoineen esitetään kuviossa 10. Kaikki kotelon liitännät ovat tiiviitä, lukuunottamatta oikealla olevaa kytkimen aukkoa, josta puuttuu suojaava peitetarra.



KUVIO 10. Koteloitu anturiyksikön prototyyppi.

2.3 Loggerilaitteen suunnittelu

Proessori

Emoyksikön prosessoriksi sopivat hyvin MSP430 mikro-ohjainsarjan järeämmät versiot (SRAM:n koko useita kilotavuja, flash-muisti useita satoja kilotavuja), joissa on kattavat ominaisuudet myös tulevaisuuden laajennustarpeita ajatellen ja jotka pystyvät käsittelemään suuria taulukoita. Suuria taulukoita sovelluksessa ovat mahdolliset reititystaulut, käytettävän MMC-muistin 512 tavun lohkot ja verkon hallintaan ja konfigurointiin käytettävät taulukot. Prosessorissa täytyy olla riittävästi lakentatehoa tulevan ethernet moduulin lisäämistä varten, jotta se kestää vahingollisesti kuormittavat paketit (verkon kautta tapahtuvat hyökkäykset). Päivitettävyyden täytyy olla helppoa, mikä onnistuu MSP430:n sisäisen flashin ohjelmointimoduulin avulla. Softa voidaan siis periaatteessa tehdä päivitettäväksi esimerkiksi radion tai USB-liitännän kautta. Testattavuus ja saatavuus tai mahdollinen mikro-ohjaimen korvattavuus toisella vastaavalla mikro-ohjaimella täytyy myös huomioida. Hinta ei ole erityisen kriittinen tekijä missään loggerilaitteen osiossa, sillä loggerilaitteiden volyymi on luonnollisestikin moninkertaisesti pienempi kuin anturiyksiköiden. Toisaalta juuri loggerilaitteessa on kalleimmat komponentit (GPRS-moduuli, suuri akku, näyttö...), joten siinä voidaan myös tehdä suurimmat säästöt koko laitteistoa ajatellen.

Tarvittavat käyttöjännitteet

Eri lohkoille tarvittavat käyttöjännitteet vaihtelevat laajalti. Toisaalta esimerkiksi radioiden suorituskyky ja eri osien toiminnan luotettavuus riippuu jonkin verran käyttöjännitteestä. Piirien ja lohkojen käyttöjännitetarpeet ovat seuraavanlaiset:

- Prosessori: 1,8...3,6 V
- CC2500 radiopiiri: 3...3,6 V
- GPRS-moduuli: 3,4...4,2 V (ainoastaan I/O jännitteiden on oltava yhteensopivia)
- ZigBee-optio: 3,3 V (sopiva useille moduleille)
- MMC: 2,7...3,6 V / 1,8 V / 3,3 V (riippuen tyypistä)
- Flash-piiri: 2,7...3,6 V
- LCD: 3,3...5 V (riippuvainen tyypistä, lämpötilasta ja katselukulmasta).

Raudan käyttöjännitelähteiden keskinäiset lähdejännitteet on suunniteltu joustavasti konfiguroitaviksi nollavastuksilla siten että voidaan käyttää joko pelkkää ulkoista muuntajaa, tai loggerilaitteeseen asennettavaa sisäistä Li-Ion-akkua, joka vain ladataan ulkoisella muuntajalla. Oletuskonfiguraatiossa Käyttöjännite laitteelle tuodaan ulkoisella muuntajalla (+9-15 V). Muuntajan jännite lasketaan buck tyyppisellä hakkurilla GPRS-moduulin akkulaturipiirin vaatimaan tasoon (+5,5 V). Akulta otetaan puolestaan kaikki muut käyttöjännitteet. Akkujännitteestä hakataan toisella stepdown hakkurilla 3,3 V käyttöjännite prosessorille, muisteille radiolle ja muulle digitaalisalle ja kolmas hakkuri on step-up tyyppinen, joka nostaa jännitteen akulta (+4,2 V...3,3 V) LCD-moduulille sopivaksi (+5 V)

LCD ja sen teholähde

LCD-moduulina käytetään standardia kaksirivistä mustavalkoista LCD moduulia (MC16021E8). Teholähteeksi voidaan valita nollavastuksella joko erillinen LCD:lle dedikoitu +5 V boost konvertteri (ZXLD1615), tai vaihtoehtoisesti akkulaturin hakkurin jännite (mahdollista jos GPRS-moduuli asennettu). LCD:n jännitteen V0 täytyy nousta noin 50 ms logiikan käyttöjännitettä jäljessä. Moduulin kontrastijännitettä ohjataan mikrokontrollerin kahden pinnin, kolmen fetin ja kolmen vastuksen avulla muodostetulla 2-bittisellä DA-muuntimella. Näin edellä oleva viive voidaan toteuttaa helposti, ja lisäksi voidaan säätää LCD-näytön kontrastia neljässä portaassa. Koska näytön käyttöjännite on +5V ja jottei näyttöä luettaessa rikota mikro-ohjainta, on lukeminen estetty kokonaan kytkemällä moduulin R/W*-pinni maahan. Rekisterit ovat siis vain yksisuuntaisia. Logiikan 3.3 V jännite on kuitenkin riittävä ohjaamaan näytön 5 V logikkaa. Käytetylle LCD:lle löytyy korvaavia malleja useilta eri valmistajilta.

Akku ja laturin teholähde

Laitteeseen tehdään akkukäytön mahdollisuus. Tämä siksi että loggerilaitteen täytyy kyetä toimimaan myös lyhyiden virtakatkosten aikana. Akkuna on 1200 mAh Litiumioni akku (Li-Ion), ja akun lataamisesta huolehtii GPRS-moduuli, johon sisältyy Li-Ion latauspiiri. Akkua ladattaessa on huolehdittava lisäksi sen lämpötilan tarkkailusta. Lämpötila-anturi on myös sisäisenä GPRS-modulissa, joten akkupaketti on tuotava

GPRS, modulin kohdalle vastakkaiselle puolelle emopiiirilevyä, ja liimattava siihen termisesti soveltuvalla liimalla. Laturiosio vaatii 5...7 V:n käyttöjännitteen ja maksimissaan 400 mA:n virran.

Laturin teholähteeksi tehdään 5,5 V Buck (step down) hakkuriteholähde. Ulostulon jänniteppeli valitaan alustavasti alle 50 mV, ja se suunnitellaan National Semiconductorin kehittämää "Switchers made simple"-ohjelmaa hyödyntäen (versio 6.24). Teholähde tarvitsee asentaa vain GPRS-modulia ja akkua käytettäessä. Laitteeseen tehdää nollavastuksilla mahdollisuus ottaa tämä käyttöön myös LCD:n käyttöjännitelähteenä.

Muistit

Loggerilaitteeseen ei riitä pienikokoinen ulkoine flash muisti, vaan mittadatan suuresta määrästä johtuen päätettiin käyttää ulkoista MMC-flash muistia. Tätä varten implementoidaan MMC-korttipaikka. MMC-muistit ovat SPI-väylän kanssa yhteensopivia, joten niille ei tarvitse eikseen varata IO:ta (tarvitaan vain oma CS-pinni). Mittausdata voidaan lisäksi näin hakea loggerilaitteelta talteen helposti myös käsin.

GSM/GPRS moduuli

Kallein yksittäinen komponentti järjestelmässä on GSM/GPRS-moduuli. Sen antennina käytetään valmista MMCX-liitätäistä GSM-monopoliantennia. Antenni sijoitetaan vastakkaiselle puolelle koteloa kuin CC2500-radion antenni jotta radiot häiritsisivät toisiaan mahdollisimman vähän. Koska moduuli on kallis, se tehdään optioksi: Laitetta voi käyttää moduulin kanssa tai ilman sitä. Lisäksi on huomattava että GSM-moduulin liittäminen laitteeseen tuo loggerilaitteen GSM-vaatimusten piiriin, jolloin se täytyy myös testata asianmukaisesti. Testaus saattaa vaatia myös ohjelmistoon mekanismit joilla esimerkiksi voidaan kytkeä GSM päälle ja pois päältä. Näiden seikkojen vuoksi moduulin lisääminen lisää merkittävästi tuotekehitys- ja valmistuskustannuksia.

Moduuliksi valittiin tarjouskyselyjen perusteella Telit GM862. Moduuli kytketään loggerilaitteen levyille tiheällä molex liittimellä. GSM-datapurskeen aikana moduuli ottaa suuren virran ja siirtymä TX-tilaan on nopea. Tämän transientin minkään osan

aikana käyttöjännite ei saa notkahtaa. Loggerilaitteen teholähteen on vastattava tähän virtatransienttiin nopeasti ja purskeen paketi ja modulaatiotaajuudet sekä carrier taajuus on kyettävä suotaamaan luotettavasti pois. Tämä tehdään suurehkoilla tantaalikondensaattoreiden ja keraamisten kondensaattorien patteristolla, joka tulee akun tai optiona olevan ulkoisen teholähteen rinnalle. Suositukset kokonaiskapasitanssille otetaan datalehdeltä. Lisäksi datalehdellä annetaan teholähteen syötämälle jännitteelle erityisiä vaatimuksia rippelille, jotka tulevat teholähteen suunnitteluparametreiksi. (GM862-QUAD/PY Hardware User Guide 2007, 21.)

Lisäksi on huolehdittava, ettei GSM moduulin oman radion vastaanottimen herkkyyks kärsi loggerilaitteesta moduuliin johtuvien tai antenniin säteilevien korkeataajuuksien häiriöiden takia ("blocking"- ja intermodulaatio-ilmiöt). Voimakkaat häiriöt saattaisivat myös kytkeytyä suoraan tai hyötysignaaleihin moduloitumalla GSM-moduulin lähetteeseen, mikä vaikuttaisi myös laitteen vaatimustenmukaisuuteen.

(Lehto & Räisänen 2006.)

Pääkäyttöjännitteen teholähde

Pääkäyttöjännite puskuroidaan suurilla ja matalan ESR:n omaavilla tantaalikondensaattoreilla ja suodatetaan huolellisesti valituilla keraamisilla kondensaattoreilla. Pääkäyttöjännitteen puskurointi on välttämätöntä GPRS-moduulin todella korkeiden ja nopeiden virtapiikkien takia, ja suodattamisessa on oltava huolellinen jotteivät hakkureiden aiheuttamat häiriöt kytkeydy GPRS-moduulin tai CC2500-radion RF-signaaliin. Varmuuden varalta käyttöjännitteiden lähteistä tehdään hyppyvastuksilla (OR) valittavia. Tämä tekee suunnittelusta myös modulaarisen riippuen halutaanko laitteessa käyttää optiona GPRS-liitäntää, tai sekä GPRS-liitäntää että akkua. Esimerkiksi pääkäyttöjännite voidaan asettaa otettavaksi vaihtoehtoisesti:

- Hakkurilta joka muuntaa akun latausjännitteen (ilman akkua, laaja käyttöjännitealue)
- Hakkurilta joka muuntaa akun latausjännitteen ja akulta
- Suoraan ulkoiselta muuntajalta ja akulta
- Suoraan ulkoiselta muuntajalta (ilman akkua, jännite oltava stabiili ja täsmälleen oikealla alueella)

Pääkäyttöjännitteen teholähde on tarkoitettu kaikille piireille LCD ja laturin hakkuri-teholähde poislukien. Teholähteellä on seuraavia vaatimuksia:

- 3,3V Step-Up hakkuriteholähde
- Ulostulon jänniterippeli alle 20 mV. Ulostulokondensaattorina todella pienen ESR:n omaava tantaalikondensaattori. Tällä mahdollistetaan teholähteen toimiminen jatkuvassa tilassa (continuous mode), ja saadaan pieni ulostulojännitteen rippeli.
- Jatkuva virrankesto vähintään 500 mA (max. 400 mA GPRS-moduulille + noin 100 mA muisteille, prosessorille, käyttöliittymälle ja muille oheislaitteille). Hetkellinen huippuvirran antokyky täytyy olla GPRS modulin vuoksi vähintään 2 A.
- Kriittisiä ominaisuuksia ovat
 - hinta
 - Pieni koko
 - Häiriöttömyys (rippeli, luotettavuus, katkominen, transienttivaste, ympäristön toimintarajat)
 - Jännitteenasettelun tarkkuus (3,3V +/-100 mV max.)

Pääkäyttöjännite tehdään LM2674D hakkuripiirillä. Piirin takaisinkytkentä tehdään jännitteenjaon kautta, jolla asetetaan piirin ulostulojännite (3,3 V).

$$U_{OUT} = 1,23V * \left(1 + \frac{R_4}{R_5}\right)$$

vastukset R4 ja R5 voivat olla luokkaa 100 kΩ...10 MΩ. Valitaan vahva takaisinkytkentä, eli jännitteenjakajan korkeammassa potentiaalissa oleva vastus R4=220 kΩ, jolloin virrankulutus jää pieneksi ja R5 tulee

$$R_5 = \frac{R_4}{\frac{U_{OUT}}{1,23V} - 1} = \frac{220k\Omega}{\frac{3,3V}{1,23V} - 1} \approx 131k\Omega \rightarrow 133k\Omega$$

(E48, E96)

Häviötehot (AC-tilan ja DC-tilan häviötehot) ja duty cycle on huomioitu ilmoittamalla piirin hyötysuhde sisääntulojännitteen ja kuormavirran funktiona. Graafeista selviää,

että kun ulostulovirta on 500 mA ja sisääntulojännite 2,4 V (riittävän lähellä sovelluksen minimiakkujännitettä) 3,3 V ulostulojännitteellä, piirin hyötysuhde on noin 77 %. Tästä voidaan laskea että piirin häviöteho

$$P_{IC} = (1 - 0,77) * (0,5A * 3,3V) \approx 0,38W$$

ja piirin ytimen (liitoksen) lämpötila

$$T_j = T_a + \theta_j - a * P_{IC}$$

$$T_j = 40^{\circ}C + 250 \frac{^{\circ}C}{W} * 0,38W \approx 135^{\circ}C < T_{jMAX} = 150^{\circ}C$$

Tämä on sallituissa rajoissa, mutta marginaalia on vain niukasti. Täytyy kuitenkin pitää mielessä että nämä ovat huonoimman mahdollisen tilanteen häviötehoja ja ulostulovirta on lisäksi ylimitoitettu. Vain noin 10...20 % käytetään hetkellisesti, ja suurimman osan (yli 90 %) ajasta koko piiri on lepotilassa, eikä juuri kuluta virtaa. Lisäksi jälkikäteen voidaan asentaa pieni jäähdytyspiiri piirin päälle, mikäli tehontarve syystä tai toisesta nousee liiaksi.

Myös piiriin implementoitu pariston jännitteen valvonta otetaan käyttöön. Pariston jännite, jossa piiri antaa ulostulosignaalin, asetetaan vastusjaolla. Vastusjaon jännitettä verrataan piirin sisällä komparaattorilla referenssijännitteeseen, joten se lasketaan kuten jännitteen asetuskin. Asetettava jännite on akun sallittu minimijännite. Tämän sanelee sisääntulossa olevan akun pienin sallittu purkausjännite, jonka se kestää ilman vaurioitumista. Li-Ion akuilla tämä on maksimissaan noin 2,4 V, useimmilla akuilla noin 2,7...2,6 V. Valitaan tähän jännitteenjakajan korkeammassa potentiaalis- sa oleva vastus $R_6=220\text{ k}\Omega$, ja alin sallittava pariston jännite 2,8 V. Nyt alemmassa potentiaalis- sa oleva vastus

$$R_7 = \frac{R_6}{\frac{U_{BATMIN}}{1,23V} - 1} = \frac{220k\Omega}{\frac{2,8V}{1,23V} - 1} \approx 172,4k\Omega \rightarrow 169k\Omega \quad (E48)$$

Todellinen alin sallittu jännite on pyörityksen seurauksena

$$U_{INMIN} = \frac{1,23V}{\left(\frac{169k\Omega}{220k\Omega + 169k\Omega} \right)} = 2,83V$$

Koska pariston tilasignaali kytketään mikro-ohjaimelle, joka käyttää eri käyttöjännitettä kuin piiri, täytyy olla vielä vastusjako myös tämän signaalijännitteen laskemiseksi alemmalle tasolle.

Hakkurin ulostulovirta tulee loppuun puretulla akulla olla vielä riittävä (0,5 A), kun Li-ion akulla napajännite voi olla minimissään 2,4 V loppuun purettuna, rajataan pienin sallittu jännite nyt 2,83 V:n, jotta saadaan marginaalia.

$$I_{load_lim} = \frac{V_{in}}{V_{out}} \cdot \left(I_{lim} - T_{off\ min} \cdot \frac{V_{out} - V_{in}}{2 \cdot L} \right) \cdot \eta \quad \text{eq. (1)}$$

$$\frac{2,8V}{3,3V} * \left(1A - 1.25 * 10^{-6} s * \frac{3,3V - 2,8V}{2 * L} \right) * \eta = 0,5A$$

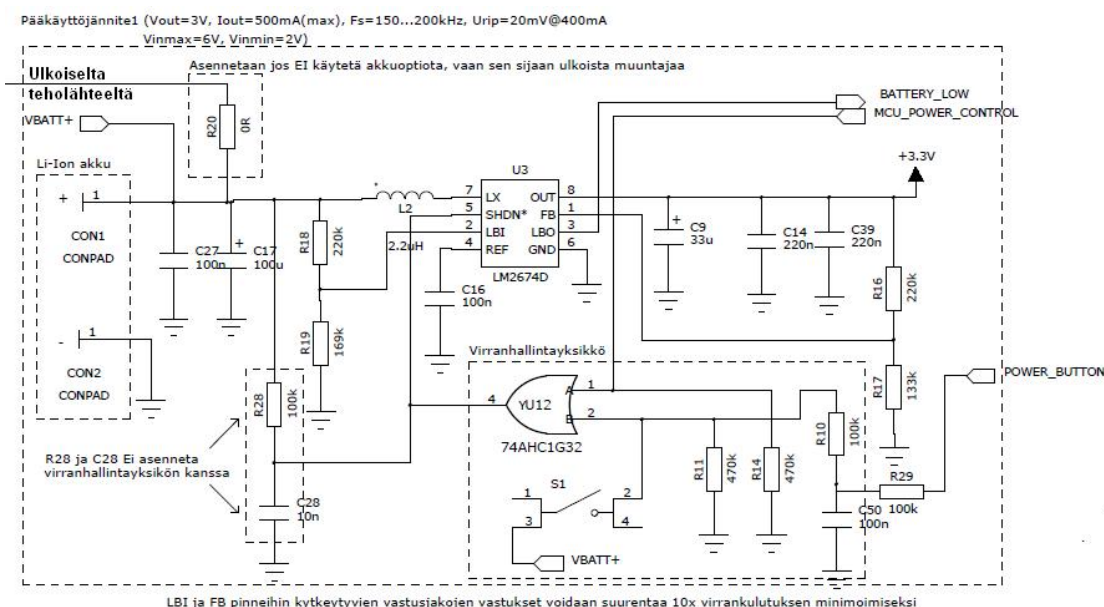
$$L = 1.25 * 10^{-6} s * \frac{3,3V - 2,8V}{2 * \left(1 - \frac{\left(\frac{0,5A}{\eta} \right)}{\left(\frac{2,8V}{3,3V} \right)} \right)} \approx 2\mu H$$

Rippelijännitteeksi halutaan alle 20mV tehollisella kuorman maksimivirralla, mikä saadaan aikaan valitsemalla kelan ja kondensaattorin muodostaman systeemin ESR riittävän pieneksi.

$$ESR < \frac{20mV}{500mA} \Rightarrow ESR < 40m\Omega$$

Lisäksi suodatuskondensaattorin rinnalle asennetaan vielä pienehkö keraaminen kondensaattori pienentämään piirin impedanssia hakkurin kytkentätransienttien aikana ja suodattamaan pois suuritaajuisia värähtelyjä.

Teholähteeseen laitetaan suurin suositusten mukaisissa rajoissa oleva ulostulokondensaattori (100 μ F), jolla pyritään takaamaan riittävän pieni ulostulon rippelijännite. 100 μ F LOW ESR- tyyppinen kondensaattori on myös GPRS-modulin suositus suodatuskondensaattoriksi. Induktorin ja ulostulokondensaattorin muodostama RC-piiri vaikuttaa myös takaisinkytkennän vaiheeseen ja sitä kautta sen stabiilisuuteen. Koska jännitetakaisinkytkennän sisäisiä napa- ja nollakohtia ei kuitenkaan tunneta, ja niiden selvittäminen työn tässä vaiheessa viivästyttäisi työn valmistumista liikaa, joudutaan tässä luottamaan viitteellisiin arvoihin, ja toiminnasta varmistutaan testeillä. Teholähteen kytkentä esitetään kuviossa 11. (LM2674 SIMPLE SWITCHER Power Converter High Efficiency 500 mA Step-Down Voltage Regulator 2012; GM862-QUAD/PY Hardware User Guide 2007, 21.)



KUVIO 11. Pääkäyttöjännitteen hakkuriteholähteen piirikaavio.

Muut liitännät

Laitteen paikallista käyttämistä varten siihen liitetään ohut kalvonäppäimistö. Näppäimistö ei ole skannattava matriisi, vaan jokaiselle painikkeelle on oma ulostulosignaali. Näppäimistön toiminta on näin varmempaa, ei vaadi paljon suoritinaikaa ja emissiot ovat pienemmät koska matriisia ei tarvitse skannata (radiota häiritään vähemmän). Lisäksi tämän tyyppisestä näppäimistöstä voidaan tunnistaa useita yhtäaikaaisia näppäimenpainalluksia, toisin kuin skannattavasta matriisityyppisestä näppäimistöstä.

USB-liitäntä toteutetaan FTDI:n USBUART-muuntimella, joka liitetään prosessorin UART-väylään. Tämän kautta kerätty mittaustiedot voidaan haluttaessa purkaa ja tehdä muunmuassa laitteen ja verkon konfigurointi. USB-konfigurointia varten lisätään mahdollisuus lisätä rautaan EEPROM-konfiguraatiomuisti.

Lisäksi ulkoisiin liitäntöihin tuodaan JTAG väylä ohjelmointia ja debuggeria varten, sekä GENIO-signaaleja yleisiä tarpeita (kuten hälytyksiä) varten.

Piirilevysuunnittelu

CC2500:n radio on referenssisuunnittelujen mukaisesti sovitettu emoyksikössä muuntamalla piirin differentiaalinen ulostulo diskreetillä balunilla single ended-tyyppiseksi ja 50 ohmin antenikuormaan sovitetuksi. Siirtolinjoissa ja balunissa käytetään texas instrumentsin referenssisuunnittelua, kuten anturiyksikön antennin suunnittelussakin.

Loggerilaitteen vedot ovat väylätaajuuksiin (ja perustaajuuksien harmonisiin taajuuksiin) nähden sähköisesti pitkiä, ja vaativat siksi sovittamista säteilevien emissioiden kurissa pitämiseksi ja datasiinaalien integriteetin säilyttämiseksi. Signaalien integriteetin epäonnistuminen saattaa suoraan korruptoida väylän dataa harmonisten taajuuksien heijastuessa ja summautuessa varsinaiseen etenevään hyötysiinaaliin. Ilman terminointeja saattaa säteilevistä emissioista seurata ongelmia myös radioiden vastaanottimien kanssa: Väylästä laitteen omaan antenniin säteilevät harmoniset saattavat tehdä radioista ”kuuroja” blocking ja intermodulaatio-ilmiöiden kautta. (Lehto & Räisänen 2006).

Kellolinjoina (kriittisinä linjoina) kohdellaan suunnittelussa SPI-väylän SCLK-signaaleja, kun ne ovat kauempana kuin linjan sähköinen pituus suurimman digitaalisignaalin olevan taajuuden kannalta. Kaikille liitännöille signaalin nousunopeutta ei ole ilmoitettu, mutta normaalisti tämä käsittää nykyisten logiikkapiirien signaalin nousunopeuksilla piirit, jotka ovat yli 1,5” päässä ohjaavasta piiristä. Tällöin terminoitavina kellolinjoina kohdellaan CC2550-piirin ja MMC-kortin SPI-väylän SCLK-

signaaleja. Sarjaterminoitavat linjat ovat puolestaan näiden piirien SO-linjat kyseisten piirien päässä, sekä SI- ja *CS-linjat mikro-ohjaimen päässä.

SPI liitännät ja kaikki datalinjat on tehty siirtolinjan osalta 100 ohmisiksi ja terminoitu. Anturiyksiköiden TWI-liitännät on tarkoitettu ulkoisten laitteiden liittämiseksi pitkien kaapeleiden avulla (esimerkiksi betoniin upotettava kosteusanturi tai lämpötilaanturi), joten ne terminoidaan sekä data- että kellolinjan osalta. Siirtolinjojen impedanssiksi valitaan 100 Ω , jolloin kytkentäkaapelit ovat edullisia. Datasignaaleille käytetään sarjavastusta linjaa ohjaavan piirin puolella, kun taas kellosignaaleille käytetään AC-terminointia, jossa on kondensaattorin ja vastuksen sarjakytkentä maan ja terminoitavan kellolinjan välillä vastaanottavan piirin päässä. AC-terminoinnilla saadaan kellosignaali terminoitua hyvin ja pienellä tehonkulutuksella, kun taas datalinjoissa pärjätään yksinkertaisemmalla sarjaterminoinnilla. Sopiva sarjaterminointivastus on suuruudeltaan sellainen, että sen resistanssi sarjassa ohjaavan piirin ulostuloimpedanssin kanssa vastaa siirtolinjan impedanssia, jolloin siirtolinjasta palaava heijastunut signaali terminoituu lähettävässä päässä. Eli sopiva sarjavastus

$$R_s = Z_0 - R_D$$

missä Z_0 on siirtolinjan impedanssi ja R_D on ohjaavan piirin ulostuloimpedanssi. (Signal termination methods 2005)

AC-terminoinnin etuna on sen pienen tehonkulutuksen lisäksi myös terminoinnin vaihdettavuus järeämpään (mutta tehoa syövään) rinnakkaisterminointiin korvaamalla kondensaattori nollavastuksella. AC-terminointiin sopiva kondensaattorin arvo on noin 100 pF, jolla reaktanssi yli 1.5 ns signaalin nousunopeuksilla putoaa pariin ohmiin, jolloin AC terminoinnin vastuksen ja kondensaattorin impedanssin summa toimii terminoitina tälle osalle signaalia, mutta ei toisaalta aiheuta suurta kuormaa datasignaalin perustaajuudella ja sen parill ensimmäisellä harmonisella.

Piirilevynä käytetään nelikerroslevyä, joka on minimivaatimus jotta voidaan saada aikaan määritettyjä ja hallittuja väylä- ja liuskaimpedansseja, sekä saadaan virtasil-mukoiden koko pieneksi (sähkömagneettinen emissio/immunitetti).

Kokoaminen ja mekaniikka

Kotelona anturiyksikölle käytetään valmista ABS-muovista, kaksiosaista mittalaitekotelo, jonka koko on noin 220 mm x 120 mm. Kotelossa on kaksiriviselle LCD-näytölle valmis aukko. Piirilevy tehdään koteloon sopivaan mittaan ja erillinen LCD-moduuli kohdistetaan kotelon valmiin näyttöaukon kohdalle. LCD-moduuli kiinnitetään levyyn rimaliittimellä ja tuetaan mekaanisesti erillisillä korokepaloilla.

Käyttöliittymän näppäimistönä toimii ohut (~2 mm) paksu kalvonäppäimistö, jossa on valmis liimapinta. Näppäimistö liitetään levyyn flex PCB-kaapelilla jossa on rimaliitin. Näppäimistön kaapeli viedään läpi etupaneelistä. Lämpivientireikä jää näppäimistön alle.

Antenniliitäntä viedään läpi kotelon yläosasta, kotelon kyljestä. Liittimen keskikohta tulee kotelon sauman kohdalle, jolloin sitä ei tarvitse pujottaa reikään kasatessa. Sen sijaan muut digitaaliset liitännät viedään läpi kotelon pohjapuolelta, ja ne täytyy pujottaa läpivientireikiin. Antenniliittimen ja digitaaliliitännöiden yhtäaikainen pujottaminen mekaniikkaan olisi niiden sijoittelun takia mahdotonta.

3 OHJELMISTO (SW)

3.1 Käytettävät kirjastot

Sekä anturiyksikölle että loggerilaitteelle pyritään käyttämään rakentamaan yhteiset ja mahdollisimman geneeriset kirjastot. Tämä helpottaa sekä tuotekehitystä että myöhempää ylläpitoa. Valmiita kehityskelpoisia ajurikirjastoja löytyy kosteusanturille, MSP430:n perustoiminnoille ja CC2500-radiopiirille. Sen sijaan ylemmän kerroksen koodi rakennetaan sovellukseen kohdennettuna, vaikka käytettävissä olisi periaatteessa myös valmiita käyttöjärjestelmiä. Niiden porttaus ja alustakohtaisten erikoistoimintojen lisääminen on kuitenkin aikaavievää, ja koodin kokoa ja virrankulutusta ei välttämättä saada optimoitua yhtä hyväksi sovellukseen kuin mitä se on räätälöidyllä ohjelmistolla. Myös työkaluissa pyritään käyttämään yhteisiä valintoja. Lähes kaikki ohjelmointi tehdään C-kielellä.

3.2 Käytettävät kehitystyökalut

Yksi suurimpia tuotekehityskustannuksiin vaikuttavia kuluja on valittava kehitysympäristö. Suhteellisen kevyitäkin tarpeita ajatellen aloituskustannus voi hyvässä kehitysympäristössä olla suuri, mutta puuttellinen kehitysympäristö syö rahaa ylimääräisinä työtynteinä. MSP430 prosessoreille oli harkittavana kaksi integroitua kehitysympäristöä (IDE): Texas instrumentsin oma ”Code composer essentials” (CCE) ja IAR systemsin ”IAR Embedded workbench”. CCE on ilmainen kehitysympäristö (IDE), ja sisältää myös välttämättömän debuggerin, mutta ilmaisessa versiossa on 8 kB:n rajoitus generoitavan koodin koolle. IAR sisältää myös debuggerin ja se tukee myös useita muita prosessoreita eri valmistajilta, eikä lisensoidussa versiossa luonnollisesti ole koodin koon rajoituksia mutta lisenssi on suhteellisen kallis. Aluksi IAR:n IDE:n kokeiluversiota käytettiin työssä, mutta silloisen version debuggerin huomattiin olevan jostain syystä todella hidas ja epävakaakaan MSP430:n kanssa. Koska tässä työssä tarvittiin vain tuki MSP430 MCU:lle, päädyttiin lopulta käyttämään CCE:ia.

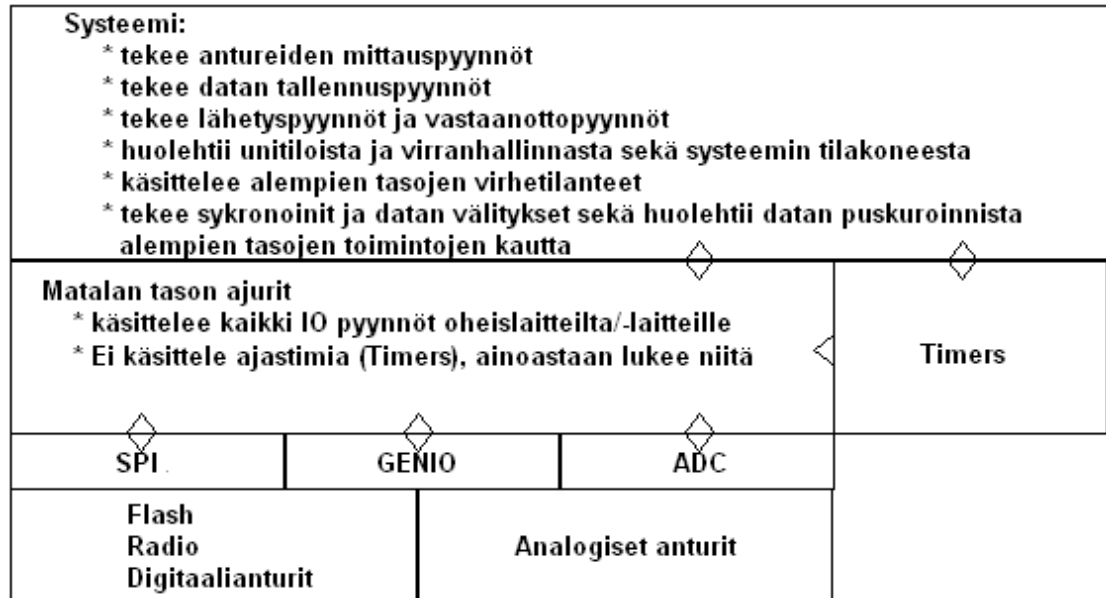
Lisäksi anturiyksikölle ohjelmoitiin C++:lla erillinen sisäänviettävästä parametrintiedostasta ”intel hex”-formaattiin kääntävä pieni ohjelma. Tällä saatiin valmis ohjelmointitiedosto jota voitiin käyttää alustamaan flashiin haihtumattomat muuttujat ja oletusarvot, protokollan oletusasetukset sekä kalibrontidatan oletukset. Samaa työkalua voidaan käyttää myöhemmässä tuotekehityksessä ja anturiyksikön parametrintiedostan tuotannossa.

3.3 Anturiyksikön ohjelmistoarkkitehtuuri

Koska koko ylemmän tason järjestelmän käsittävä ohjelmisto tehdään itse, sille on syytä hahmottaa arkkitehtuuri. Ilman arkkitehtuuria ja siinä pitäytymistä ohjelmakoodin kehitys lähtee helposti urille, joissa se ei ennen pitkää ole enää hallittavissa tai ylläpidettävissä: ohjelmiston rakentamisesta ja ylläpidosta tulee monimutkaista, debuggauksesta vaivalloista ja tarpeen tullen koodin siirrettävyydestä saattaa tulla jopa mahdotonta. Huolellinen arkkitehtuurin suunnittelu vaatii perehtymistä ja run-

saasti aikaa, mutta työ maksaa itsensä nopeasti takaisin. (Qian, Xian&Fu ym. 2010, 11)

Koska kaikki toiminta on aikakriittistä ja virrankulutuksen kannalta kriittistä ja resursseja toimintojen suorittamiseen niukasti, arkkitehtuuri on päätetty valita melko staattiseksi ja yksinkertaiseksi (ks. kuvio 12). Ohjelman ja sen osien reaaliaikaisuus ja siirrettävyys jätetään pienemmälle painoarvolle.



KUVIO 12. Anturiyksikön ohjelman arkkitehtuuri.

3.4 Protokolla radiolle

Yleisesti

Työn aloitusvaiheessa radiolle sopivaa vähävirtaista liikennöintiprotokollaa ei ollut valmiina tarjolla ja koska tarpeet ovat melko vaatimattomia, protokolla kehitettiin itse. Protokollassa ajat ja datanopeudet ovat vapaasti määritettäviä, mutta riittävän alhaisen virrankulutuksen aikaansaamiseksi yhden laitteen pakettien vastaanottoon tai lähetykseen kuluva aika voi olla vain kymmeniä millisekunteja (laitteen datajakso) muutamien minuuttien ajanjaksoissa (yhteysjakso). Tässä ajassa pitää ehtiä välittää kaikki tarvittava data kullakin yhteysjaksolla, mukaanlukien pakettien kuittaukset ja mahdolliset uudelleenlähetykset. Lisäksi tärkeänä protokollan ominaisuutena on aikakanavointi: Paketit lähetetään kunkin laitteen välillä keskenään synkronisesti. Jo-

kainen laite varaa kanavan vain omalla sille varatulla aikasiivullaan, jolloin se ei häiritse muita laitteita. Laitteet eivät siis yritä huutaa toistensa ylitse.

Protokollan tehollista jaksoa rajoitetaan standardissa EN 300 440, ja lopulliset vaatimukset määräytyvät toteutuvan tehollisen jakson perusteella. Lisäksi käytettävää kaistanleveyttä, tehonkierttoa ja tehoa säädellään radiotaajuuslaissa, viestintäviraston määräyksessä 15 AD/2012 M (EN 300 440; 15 AD/2012 M)

Mesh-protokollan toiminta

Verkko alettiin toteuttaa yksisuuntaisena ja tähtikytkentäisenä. Kehityksen edetessä se huomattiin kuitenkin puutteelliseksi, ja verkko muokattiin mesh-tyypiseksi. Oleellisena osana protokollaa on synkronisuus: Mitään lähetystapahtumaa ei tehdä muuten kuin ennalta määrättyinä ja jokaisen anturiyksikön kohdalta tunnettuna ajankohdana. Näin vältetään lähetysten päällekkäisyys ja säästetään virtaa, kun tiedetään milloin radion pitää olla aktiivisena. Protokollan toiminta pääpiirteittään on kuvattu alla vaiheittaisina tiloina.

1. Loggeri lähettää synkronointipakettia broadcast-tyyppisenä viestinä, jonka kaikki kuulevat anturiyksiköt vastaanottavat ja käsittelevät.
2. Kun anturiyksikkö saa synkronointipaketin, se asettaa kellonsa paketin aikaleiman mukaiseen aikaan ja lähettää loggerilaitteelle kiittauspaketin, josta loggeri voi poimia vastanneen laitteen Device_ID:n, jonka perusteella määräytyy myös milloin laite on vastaanottotilassa (synkronointiajankohta + ID:n viimeinen tavu[s]). Tällöin loggerilaitte voi yrittää lähettää pakettia anturiyksikölle juuri silloin kun se kuuntelee (muun ajan anturiyksikön radio on pois päältä). Anturiyksikkö tallentaa tiedon yhteydestä loggeriin (System_Bitfield.Logger_Found=1) ja on nyt synkronoitu ja valmis synkronoimaan muita anturiyksiköitä
3. Kun anturi on valmis synkronoimaan muita anturiyksiköitä, se lähettää synkronointijaksolla (määräytyy synkronoidusta ajasta, Device_ID:n alimmasta tavusta, sekä synkronointijakson ajoitustiedosta) synkronointipaketin toisille anturiyksiköille (broadcastina), jonka kaikki kuulevat anturiyksiköt vastaanottavat. Mikäli anturi menettää synkronoinnin tai radio jumiutuu (ei yhtään yhteyttä saatu määräajassa), anturi yrittää ilmoittaa uuden tilansa järjestelmäl-

le, lakkaa lähettämästä synkronointipaketteja ja siirtyy takaisin kuuntelutilaan odottamaan uutta synkronointipakettia.

4. Ainoastaan synkronoidut anturiyksiköt saavat lähettää synkronoiteja toisille verkon anturiyksiköille. Toiselta anturilta tulleen synkronointipaketin mukana tulee tietoja, jotka anturiyksikkö tallettaa radioliikennöintiä varten. Näitä tietoja ovat synkronointipaketin lähettäneen laitteen
 - a. RSSI. Mikäli mikäli tulee mahdollisuus liikennöidä paremmalla RSSI:llä, yhtä monen solmun päässä loggerista kuin nykyinen yhteys, yhteys vaihdetaan tähän.
 - b. Solmujen määrä ennen loggerilaitetta (`Devices_Before_Logger`), jotta tiedetään tarvittavien uudelleenlähetysten määrä. Kukin anturiyksikkö laskee tämän itse (alkaen ensimmäisetä laitteesta joka saa yhteyden loggeriin), ja välittää tiedon edelleen omassa synkronointipaketissaan seuraavalle anturiyksikölle.
 - c. `Device_ID`, jotta voidaan lähettää loggerille lähetettävät paketit synkrooidun (loggerin yhteydessä olevan) anturiyksikön kautta.
5. Kun anturiyksikön tarvitsee lähettää dataa loggerille, se lähetetään paketissa, joka lähetetään edelleen `Devices_Before_Logger` kertaa kunnes se saavuttaa loggerin. Lähetys toimii siis ketjutettuna anturilta toiselle, käänteisessä järjestyksessä kuin missä ovat vastaanottaneet toistensa synkronointipaketit ja rekisteröineet toisensa yhteyslaitteiksi. Jokainen yhteyslaite on yhteydessä loggeriin ketjun kautta, mutta mikäli jokin yhteys menetetään, verkko korjaa itsensä anturien siirryessä takaisin synkronointitilaan. Mikäli joitain yksittäisiä paketteja ei voida välittää eteenpäin, anturiyksikkö tallentaa paketin, jolta mittaus on lähtöisin ja lähettää sen kun pystyy.

Hallinnollisena osana loggerilaitteeseen liitettävien laiteiden ID:t konfiguroidaan loggerille listaksi. Listan konfigurointi tapahtuu ainoastaan Lamit:n oman palvelimen kautta. Anturiyksiköt täytyy tätä varten lisensoida Lamit:n kautta, jotta ne voidaan ottaa käyttöön tietyille laitekokoospanolle. Tällä lisäksi estetään verkkojen sekoittuminen esimerkiksi naapurirakennuksessa olevien mittalaitteiden kanssa. Jos halutaan käyttää useampaa loggerilaitetta kaikille käytössä oleville anturiyksiköille, tämä onnistuu konfiguroimalla jokaiselle loggerille kaikki anturit jotka ovat käytössä. Loggeri-

laite huolehtii listan avulla, että vain sille lisensoidut anturit saavat ottaa siihen yhteyden. Näin voidaan tunnistaa eri omistajien laitteet, tai muuten erilliset laiteko-koonpanot.

3.5 Anturiyksikkö

Protokollan ajoitukset ja virrankulutus

Koska yksittäisen laitteen radiolla täytyy olla pakettien kuittausten ja datan jaksotuksen vuoksi useita tilansiirtymiä, suoja-ajan (guard period) siirtymien välillä täytyy olla lyhyt, jottei datajakson pituus kasva liian pitkäksi. Jotta lyhyt suoja-aika puolestaan on mahdollinen, täytyy radioiden tilakoneiden olla keskenään jatkuvasti keskenään synkronoituja parin millisekunnin tarkkuudella. Arviota kellojärjestelmän tarkkuudelle voisi antaa seuraavasti: Jos yhteysjaksosta määrätään 256 s pituinen, käytettävä datanopeus on noin 20 kbps ja paketin pituus on vakioitu 40 tavuun (8 bittiä) radiotiellä käytettävät "preamble" ja "guard" bitit mukaanluettuna sekä CC2500:n sisäisessä protokollassa käytettävä osoitetavu ja CRC-dataan lisättynä, tulee yksittäisen datapaketin ajalliseksi pituudeksi

$$(1/20000 \text{ bps}) * 8 \text{ (bit)} * 40 = 16\text{ms}$$

Protokollassa sallitaan 3 datapakettia kullakin yksittäisen laitteen datajaksolla (esimerkiksi 3 erillistä mittausta). Koska jokaiselle datapaketille täytyy normaalisti vastaanottaa myös kuittaus, ja laitteita on sovittu verkkoon mahtuvaksi enimmillään 40 kpl, tulee datajakson pituudeksi

$$16 \text{ ms} * 3 * 2 * 40 = 3840 \text{ ms}$$

Jos päätetään että suoja-aikaa voidaan sallia kutakin datapakettia kohti toiset noin 16ms ilman että virrankulutus kasvaa liiaksi, tulee kaikkien laitteiden datajakson yhteispituudeksi

$$2 * 3840 \text{ ms} = 7680 \text{ ms}$$

Protokolla vaatii tämän lisäksi erillisen loggerilaitteen broadcast-tyyppisen datajakson (kuittaus kaikilta mahdollisilta laitteilta), jonka pituus on minimissään noin 4500ms (data ja kuittauks) ja erillisen synkrontijakson jonka aikana jokainen anturiyksikkö kysyy aikakanavoidusti sille varatulla aikasiivulla sen kantoalueella olevia toisia synkronoimattomia anturiyksiköitä synkronoimaan kellonsa välitetyn ajan perusteella jonka jälkeen synkronoiva anturiyksikkö odottaa kuittausta aikakanavoidusti kullekin laitteelle. Synkronointijakson pituus on siis yhdelle laitteelle minimissään noin

$$\begin{aligned} & ((1/20000 \text{ kpbs}) * 8 \text{ (bit)} * 40 + t_{\text{guard}}) * (40 + 1) = \\ & ((1/20000 \text{ kpbs}) * 8 \text{ (bit)} * 40 + 16 \text{ ms}) * 41 = 1280 \text{ ms} \end{aligned}$$

Ja jotta kaikki verkossa sallitut 40 anturiyksikköä ehtivät synkronoida ympäristössään olevat laitteet, tulee koko synkronointijakson pituuden olla vähintään noin

$$40 * 1280 \text{ ms} = 51,2 \text{ s}$$

Koko yhteysjakson pituus on siis minimissään noin

$$\begin{aligned} & T_{\text{sync_rx_tx}} + T_{\text{data_rx_tx}} + T_{\text{broadcast_tx}} = \\ & 51200 \text{ ms} + 7680 \text{ ms} + 4500 \text{ ms} = 63380 \text{ ms} \end{aligned}$$

Tästä voidaan todeta että yhteysjakson venyttäminen niin sanotulla kuolleella ajalla esimerkiksi 256 sekuntiin voisi olla käytännöllinen. Ylijäävällä kuolleella ajalla ei ole dataliikenettä, ja kuolleen ajan jälkeen yhteysjakso alkaa taas alusta. Edellämainitut luvut ovat viitteellisiä ja karkeita, koska protokolla on joustavasti konfiguroitavissa. Käytetyt luvut ovat kuitenkin testeillä hyviksi todettuja ja suositeltavia minimejä.

Hyvissä olosuhteissa radio on TX-tilassa maksimissaan kolme kertaa omalla datan lähetysvuorolla (heartbeat tai datapaketti omalle yhteyslaitteelle), kerran kuitatesaan synkronointipaketin sopivimmalle yhteyslaitteelle, ja kerran lähettäessään itse synkronointipaketin. Lisäksi synkronointipakettiin vastaavat laitteet täytyy hyväksyä

yhteyslaitteiksi, ja tästä tulee neljä TX-jaksoa lisää (olettaen että reititettävien yhteyslaitteiden sallittu maksimimäärä on neljä).

RX-tilassa radio on on loggerilaitteen broadcast jaksolla aina 240 ms. Muutoin RX-tilassa kuunnellaan pakettien pituuksien ajan kolme kertaa kuittauksia omalla data-jaksolla, neljä kertaa dataa reititettäviltä laitteilta joiden yhteyslaitteena toimitaan ja 40 kertaa yhteyspyyntöjä synkronointijaksolla (vastauksia lähetettyyn synkronointipakettiin).

Yhden TX-tilan kestoksi jää normaalisti 16 ms, koska TX-tilasta poistutaan heti paketin lähetyksen jälkeen. Koska keskinäisellä synkronoinnilla on rajallinen tarkkuus, täytyy RX-tilaan siirtyä suoja-ajan verran ennakkoon. RX-tilasta poistutaan heti kun paketti on vastaanotettu, joten yhden RX-tilan kestoksi tulee keskimäärin (olettaen että ajallinen ajautuminen on keskimäärin +/-0 ms, ts. kiteen tarkkuus noudattaa hyvin normaalijakaumaa)

$$T_{data} + T_{guard} = 16 \text{ ms} + 16 \text{ ms} = 32 \text{ ms}$$

Näistä saadaan TX:n ja RX:n kestoksi yhteysjaksolla kaikkiaan siis

$$T_{tx} = 3 + 1 + 1 + 4 * 16 \text{ ms} = 144 \text{ ms}$$

$$T_{rx} = 240 \text{ ms} + 47 * 32 \text{ ms} = 1744 \text{ ms}$$

Edelläolevista ajoista voidaan myös laskea karkeasti radion virrankulutus, joka on sovelluksessa dominoiva tehon kulutuksen kannalta normaaleilla useiden minuuttien mittausväleillä. Tehollinen jakso (duty cycle) huomioiden radion virrankulutuksesta tulee siis verrannollinen yksittäisen radion päälläoloajan ja koko yhteysjakson pituuden suhteeseen.

$$T_{tx}/256 \text{ s} * I_{tx} + T_{rx}/256 \text{ s} * I_{rx} =$$

$$144 \text{ ms}/256000 \text{ ms} * 21,5 \text{ mA} + 1744 \text{ ms}/256000 \text{ ms} * 17,3 \text{ mA} = \sim 130 \text{ uA}$$

Virrat RX- ja TX-tiloissa ovat datalehdeltä, mutta ovat jonkin verran riippuvaisia radion asetuksista joten virrat ovat jossain määrin arvionvaraisia. Lisäksi huonoissa yhteysoloissa yhteys saattaa toistuvasti katketa, ellei synkronointia pystytä vastaanottamaan ennalta määrättyssä ajassa, jolloin synkronoinnin menettäneen anturiyksikön radion täytyy olla jatkuvasti RX-tilassa niin kauan kunnes se saa uuden synkronointipaketin. Virrankulutukseen tekee lisäksi eroa oskillaattorin kalibrointiin kuluva ajanjakso (tyypillisesti noin 2 ms) ja se että siirtymissä radiota joudutaan jokaisella yhteysjaksolla pitämään jonkin verran myös IDLE-tilassa, jossa virrankulutus on 1,5 mA:n luokkaa. IDLE-tilaa tarvitaan jotta radion oskillaattorilla ja muillalohkoilla on aikaa käynnistyä, ja voidaan siirtyä riittävän nopeasti RX- tai TX-tilaan. Datanopeutta kasvattamalla saataisiin virrankulutusta tietenkin pudotettua, mutta on tehtävä kompromissi datanopeuden (datajakson keston ja sitä kautta virrankulutuksen) ja liikennöintietäisyyden (radion herkkyyden) välillä, koska datanopeuden kasvattaminen pudottaa radion herkkyyttä. Oleellisina parametreina tässä ovat erinäisten filttreiden kaistanleveyden ja modulaatiossa käytettävän signaalin kaistanleveyden, ja modulaatiotavan valinta. Samoilla parametreilla on tehtävä yhtä aikaa kompromissi herkkyyden lisäksi häiriösietoisuuden suhteen. Häiriösietoisuutta voidaan lisäksi parantaa useita muita radion toimintoja parametroimalla, tosin näissä tapauksissa useimmiten virrankulutuksen kustannuksella. (CC2500 Low-Cost Low-Power 2.4 GHz RF Transceiver (rev. C) 2009.)

Käyttöliittymän tilakone

Koko anturiyksikön UI koostuu kolmesta ledistä ja yhdestä painikkeesta. Kaksi ledestä ilmaisee latauksen tilaa, ja yksi radion tiloja. Ledin tilanilmaisu on konfiguroitava, mutta oletuksena se kertoo radion aktiivisen RX/TX-tilan (välähtää), sekä jaksollisesti myös reaaliaikakellon ”nollakohdan” (palaa sekunnin ajan).

Tilakonetta voidaan ohjata yhdellä painonapilla, painamalla nappia 1-3 sekuntia laite menee päälle ja pois päältä. Painamalla 3-5 sekuntia laite menee signaalin hakutilaan, jossa voidaan hakea paras radiolinkki ja naturin asento asennusvaiheessa. Painamalla 5-10 sekuntia laite menee kalibrointitilaan.

Kalibrointi

Anturiyksikön antureiden kalibrointi tehtiin sigma-delta ADC:lle, ja se kattaa siis analogiset anturit. Kalibroinnin yhteydessä anturiyksikölle kerrotaan myös anturin tyyppi (mittausdatan tyyppi välitetään aina datan mukana). Yksiköissä oletetaan SI järjestelmän mukaiset perussuureet. Ennen varsinaista kalibrointia laitteelle kerrotaan missä kolmessa pisteessä kalibrointi tullaan tekemään, joko suoraan ohjelmoimalla tai parameroimalla ne radion kautta haihtumattomaan datamuistiin (flash).

Varsinainen kalibrointi tapahtuu asettamalla anturille vuoron perään kolme referenssipistettä, ja kertomalla radion välityksellä onko kyseessä alin, keskimäinen vai ylin suureen referenssipiste. Kun kaikki kolme pistettä on mitattu sähköisesti, ja anturille on kerrottu näitä lukemia vastaavat fyysiset suureet, anturille annetaan radion kautta kalibroinnin laskentakomento. Laskentakomento laskee tämän perusteella BFSL metodilla kaksi erillistä kalibrointisuoraa (moemmille oma kulmakerroin ja offset): Ensimmäinen suora alimmasta kalibrointipisteestä keskimäiseen ja toinen suora keskimäisestä kalibrointipisteestä ylimpään. Näitä suoria voidaan jatkossa käyttää suoraan mitatun fyysisen suureen tarkkaan määrittämisen. (Wilson, Jon S. 2004, 419)

3.6 Loggerilaite

Loggerin ohjelmisto oli tarkoitus tehdä osana erillistä opinnäytetyötä. Loggerilaite toteutettiin mutta siihen ei ollut koskaan työn aikana käyttökelpoista ohjelmistoa. Tämän vuoksi loggerilaitteen simulaatio tehtiin käytännössä kääntämällä yhdelle anturiyksikölle samasta ohjelmistosta erillinen versio käännöslipuilla, ja sille määrättiin loggerilaitteen identifioiva laite ID. Loggerilaitetta simuloiva laite lähetti ainoastaan synkronointipaketit muulle verkolle, jäi kuuntelemaan saapuvia datapaketteja ja tallensi mittausmuistiin vastaanotetut paketit. Vastaanotettu mittausdata pystyttiin purkamaan ja tarkistamaan ainoastaan toisella erillisellä, loggerilaitetta simuloivalla ohjelmiston käännöksellä.

4 KENTTÄTESTI

4.1 Tarkoitus

Kenttätesti suunniteltiin keskittymään ensisijaisesti radion ja protokollan testaamiseen. Se kertoo miten hyvin onnistuttiin toteuttamaan radion, antennin ja niiden balunien ja filttareiden suunnittelut, sekä miten radio ja verkko sietävät normaaleja ympäristön häiriöitä. Toiseksi keskitytään anturiyksiköiden virrankulutukseen.

Testissä tulee valvoa miten usein anturit hukkaavat synkronoinnin ja paljonko ne keskimäärin kuluttavat virtaa kenttätestin aikana. Lisäksi tarksitetaan että mittausdataa tulee odotettu määrä jokaiselta anturilta ja mittausdatan suuruusluokka on odotettua.

4.2 Kokoonpano

Koska loggerilaitteen ohjelmisto oli tarkoituksena toteuttaa osana toista opinnäytetyötä, ja koska tämä tämä jäi kuitenkin tekemättä, varsinaista kenttätestiä ei toteutettu. Sen sijaan tehtiin suppeampi testi neljällä anturiyksiköllä, joista yksi anturiyksikkö simuloi loggerilaitetta. Poikkeuksena tässä oli ainoastaan mittausmuistin rajallisuus anturiyksikössä, mutta muille anturiyksiköille tilanne oli virtuaalisesti sama kuin varsinaisella loggerilaitteella tehtynä.

Pääasiallisena testiympäristönä oli kerrostaloasunto, jossa on paksuja betoniseiniä ja metallirakenteita. Katvealueiden aikaansaaminen tällaisessa ympäristössä oli helppoa. Lisäksi testattiin vapaan tilan kantamaa ulkotiloissa, maaseudulla osittain puupuitteisessa ja suhteellisen tasaisessa maastossa.

4.3 Testitulokset ja kehitysehdotuksia

Aluksi jokin sotki painenaturin mittaukset. Oletettavasti ulostulossa olevien signaalin suodatuskondensaattoreiden lataamiseen menevä syöksyvirta aiheutti tämän, huo-

limatta siitä että piirille oli jo sallittu noin seitsemän aikavakion mittainen stabiloitumisaika (ks. kappale 2.1: ADC:N SKAALAN MITOITUS). Tämä korjattiin sallimalla piirille pidempi transienttitilan stabiloitumisaika ennen piirin jännitteen mittausta.

Antureista suhteellinen kosteusanturi osoittautui odotusten mukaiseksi. Testaamiseen käytettiin kylläisiä NaCl ja KCl-suolaliuoksia, joilla voidaan luoda varsin stabiileja kosteusreferenssejä. (Equilibrium Relative Humidity - Saturated Salt Solutions 2009; Liite 1). Vastaavia referenssejä voitaisiin periaatteessa käyttää tuotannossakin kosteusanturien kalibroimiseen rajatulle kosteusalueelle. Myös paineen mittausta, ja kalibrointialgoritmi näytti toimivan moitteetta, tosin käytössä ei ollut absoluuttisesti tarkkoja painestandardeja tai referenssejä joilla tämä olisi voitu varmistaa.

Anturien liikennöinti-protokolla huomattiin tietyiltä osin puutteelliseksi työn edetessä, ja sitä jouduttiin muokkaamaan ja täydentämään. Ongelmat liittyivät lähinnä tiettyjen kuittausten välittämiseen ja anturien ketjuttamiseen mesh-verkossa, johon päätettiin siirtyä tuotekehityksen aikana.

Lisäksi tehtiin virrankulutuksen optimointia mittaamalla kulutusta ja minimoimalla kuluttavia prosesseja. Keskimääräinen virrankulutus asettui lopulta noin 400 uA:n tuntumaan. Anturiyksiköiden virrankulutusta voidaan säätää tätäkin pienemmäksi muuttamalla parametroitavan radion tilakoneen asetuksia ja sallimalla pidempi aika-väli radion aktiivisten tilojen välillä. Samalla mittauksia täytyy tehdä harvemmin jotta kaikki mittaukset on edelleen mahdollista välittää harventuneilla yhteysjakoilla.

Suurimman ongelman työhön aiheutti se että ainoa debug väylä oli JTAG-liitäntän kautta. Tämä kyllä salli tehokkaan debuggaamisen texas instrumentsin Code composer studio IDE:llä, mutta edelleen puuttui tehokas keino etsiä vikoja jotka liittyivät järjestelmän tilansiirtymiin, järjestelmän keskinäisiin ajoituksiin, ja mesh verkossa tapahtuvaan liikennöintiin ja synkronointiin. JTAG-liitäntän kautta tämän tyyppisiä ongelmia oli todella aikaavievää ja vaikeaa tutkia koska se vaati keskeytysten asettamista, mikä muutti ohjelman kulkua, eikä kertonut mitään edeltävistä tiloista. Edeltävien tilojen lokia ei myöskään voinut tallentaam anturiyksikön muistiin riittävän yksityiskohtaisesti rajallisten muistiresurssien takia.

Tehokkaampi tapa tämän tyyppisten ongelmien tutkimiseen olisi ollut jos prosessorissa olisi ollut yksi liitäntä esimerkiksi nopean RS-232:n tai USB:n kautta, jonka kautta järjestelmä olisi suoritusta keskeyttämättä voinut kertoa tilakoneen tilansiirtymistään ja antaa tietoa järjestelmän muista keskeisistä operaatioista. Kaikkiin tietoihin olisi voitu liittää anturiyksikön reaaliaikakellon aikaleima, ulkoisen kellon tarkka aika-leima ja laitteen yksilöllinen tunnus, jolloin anturien välistä synkronista toimintaa olisi voitu tehokkaasti seurata. Parasta olisi jos nämä tiedot olisi voitu yhdistää esimerkiksi kahdesta tai kolmesta laitteesta tarkoitusta varten tehdyllä erillisellä debug laitteella, joka olisi yhdistänyt lokit ja lähettänyt ne jonkin sopivan liittymän kautta eteenpäin. Tällainen erillinen debug-laite olisi myös mahdollistanut sen, ettei anturiyksikön rautaan olisi tarvinnut tätä tarkoitusta varten implementoida muuta kuin liitin debuggeria varten, ja debuggeri olisi huolehtinut esimerkiksi signaalien tasonsovituksesta ja yhteen tuotujen väylien näennäisestä arbitroinnista.

Toinen vaihtoehto debug ongelmiin olisi ollut huomattavasti suuremman flash ja RAM muistin omaava prosessori, jolloin olisi voitu käyttää JTAG-väylää CIO-funktioilla tapahtuvaan viestien välitykseen. Näitä ei valitulla prosessorilla ollut mahdollista implementoida ohjelmaan.

Toinen suuri ongelma oli reaaliaikakellon sotkeutuminen. Nähtävästi radion modulaatiotaajuus (lähelle sama kuin kaistanleveys) kytkeytyi jollain mekanismilla reaaliaikakellon signaaliin. 32 kHz:n ulkoinen kide tulisi layoutissa erottaa omalla maa-laueellaan muusta layoutista, millä estettäisiin radion virtojen kulkeminen kellon läheltä. Lisäksi radion käyttöjännite tulisi suodattaa paremmin. MCU:n elektroniikan ympärille voi myös harkita käytettäväksi pintaliitettävää Faradayn häkiä, mikä on kuitenkin suhteellisen kallis ratkaisu.

Toinen reaaliaikakelloon liittynyt ongelma aiheutti työssä alkuvaikeuksia: MSP430 piireissä analoginen käyttöjännite (AVCC) toimii ADC:n lisäksi koko MCU:n kellojärjestelmän analogiaosan käyttöjännitteenä, ja sitä ei tämän vuoksi voi, eikä saa sammuttaa. Kuitenkin ulkoinen analogiapiiri oli suunniteltu rautatasolla sammutettavaksi juurikin sammuttamalla niille yhteinen AVCC käyttöjännite. Kokeilujen ja vianhaun

kautta ongelma ratkesi, vaikkakin tarkka juurisyy jäi mysteeriksi. Ongelman ydin selvisi lopulta keskustelupalstojen kautta, ja on huomattavaa on että tätä ominaisuutta ei tuolloin ollut dokumentoitu käytetyn mikro-ohjaimen manuaalissa, datalehdessä tai yhdessäkään sitä koskevassa sovellusohjeessa sillä tasolla että sitä olisi voinut edes päätellä (SIC!). (Turning off AVCC only 2007.)

Radion kantama kerrostaloympäristössä todettiin riittäväksi, ja vapaassa tilassa kantama oli ensimmäisellä protoversiolla noin 150 m, joka on hyvä tulos, joskin jonkin verran alle oletetun laskennallisen kantaman. Tämä selittyy osin käytetyn vaimenusmallin puutteista ja mallin eroista todelliseen ympäristöön. Tosin todettiin myös että antenniliitännän balunin ja harmonisten filterin komponentteja parantamalla saatiin linkin pituutta yli tuplattia. Varsinaisesti komponenttiarvoja ei muutettu, mutta vaihdettiin komponenttityyppejä 2,4 GHz:n yläuolella paremmin toimiviin vaihtoehtoihin, joilla parasiittiset ominaisuudet ja dielektrin ominaisuudet olivat suotuisimmat.

Anturiyksikön antennia mitatessa siinä huomattiin viritystaajuuden olevan pielessä, tarkasta antennin referenssisuunnittelun kopioinnista huolimatta. Tämä selittyi sillä että referenssisuunnittelussa ollut pintakuparointi antennin kuparoinnin puolelta jäi pois. Pintakupari toimii referenssitasona antennin sähkökentille, ja vaikuttaa siksi laskostetun dipoliantennin impedanssiin. Protoversiossa tämä korjattiin liimaamalla referenssitason kohdalle pätkä kupariteippiä, joka maadoitettiin usesasta pisteestä. Parannus radion kantamaan oli varsin huomattava.

Akkuja ladattiin testien aikana useita kertoja, eikä niissä huomattu merkittävää kuumenemista. Lataus näytti myös akkujännitteen perusteella menevän loppuun asti ja latauksen indikointi toimi odotetusti.

Joitain suunniteltuja toimintoja (kuten signaalinhakutila ja etäpäivitys) jäi vielä työssä keskeneräiseksi. Ohjelmistoon on toteutettu vain niiden prototyypit ja tukifunktiot. Nämä toiminnot eivät sisältyneet alkuperäiseen vaatimusmäärittelyyn vaan tulivat tuotekehityksen myötä, eivätkä siis myöskään alun perin kuuluneet tämän opinnäytetyön suunniteltuun sisältöön.

LÄHTEET

15AD/2010 M. 2010. Viestintäviraston määräykset, Viitattu 1.8.2010.
http://www.ficora.fi/attachments/suomiry/673nwMisz/Viestintavirasto_15AD2010M.pdf

1999/5/EC. 2009. R&TTE direktiivi, European Commission, official Journal of the European Communities. Julkaistu 7.4.1999

200 kPa On-Chip Temperature Compensated Silicon Pressure Sensors. 2012. Freescale MPX2202 yksiporttisen paineanturin datalehti. Viitattu 8.10.2012.
http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MPX2202.pdf

4 Inch Water Pressure Sensors, rev. A. Allsensorsin 4INCH-D-4V paineanturin datalehti. Viitattu 13.1.2010. <http://www.allsensors.com/datasheets/DS-0022-Rev-A.pdf>

Aloituspalaverit ja käydyt keskustelut työn tilaajan kanssa. 2008. Suolahti: Lamit.fi

Atmel AT45DB081D datasheet, rev. M. 2010. AT45DB flash muistipiirin datalehti. Viitattu 11.12.2010. <http://www.atmel.com/Images/doc3596.pdf>

Audun Andersen. 2006. DN004 Folded Dipole Antenna for CCC25xx. Viitattu 8.9.2009. Texas Instrumentsin CC25xx sarjan piirien kanssa käytettävän dipoliantennin referenssisuunnittelu: DN004, http://www.ti.com/tool/cc25xxem_ref_des, DN004 Folded Dipole Antenna for CCC25xx

CC2500 datalehti, Texas Instruments. Viitattu 2.9.2009.
<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/cc2500.pdf>

CC2500 Low-Cost Low-Power 2.4 GHz RF Transceiver (rev. C). 2009. CC2500 radiopiirin datalehti. Viitattu 10.9.2009. <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/cc2500.pdf>

CC2500EM reference design, rev. A. Texas Instruments. Julkaistu 2009. Viitattu 3.9.2009. http://www.ti.com/tool/CC2500EM_REFDES, technical documents, CC25xxEM Folded Dipole Reference Design

Cherry, J. 1999 Continuous-time Delta-sigma Modulators for High-speed A/D/ Conversion : Theory, Practice, and Fundamental Performance Limits. 7 p. Hingham, MA, USA: Kluwer Academic Publishers.
<http://site.ebrary.com/lib/jypoly/Doc?id=10053002&ppg=39>

Designing with the MPC3551 Delta-Sigma ADC. 2005. Sovellusohje AN1007. Microchip Technology Inc. Viitattu 19.9.2009.
http://www.microchip.com/stellent/idcplg?IdcService=SS_GET_PAGE&nodeId=1824&appnote=en024849

Equilibrium Relative Humidity - Saturated Salt Solutions. Viitattu 13.1.2009.
<http://www.omega.com/temperature/z/pdf/z103.pdf>

European Telecommunications Standardization Institute. Viitattu 12.1.2010.
www.etsi.org, standards

GM862-QUAD/PY Hardware User Guide rev. 3. 2007.
<http://www.roundsolutions.com/techdocs/>, GM862-QUAD-PY

Ilmavirtojen mittaus- ja säätöopas 2010. 2010. Fläktwoods Oy Ab: Turku.
 FWG_Ilmavirtojen mittaus- ja säätöopas_2010.03_4989 FI

ITU-R P.1238-1. 1999. International Telecommunication Union, Propagation Data and Prediction Methods for Planning of Indoor Radiocommunication Systems and Radio LAN in the Frequency Band 900 MHz to 100 GHz. Julkaistu 10.1999. Viitattu 2.9.2009. http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1238-1-199910-S!!PDF-E.pdf

Kysymyksiä ja vastauksia – Ilmanpaine. 2007. Ilmatieteen laitoksen kotisivut. Viitattu 8.6.2007. http://www.fmi.fi/kysymyksiä/index_13.html

Lamit.fi-yrityksen kotisivu. 2009. Viitattu 13.1.2009.
<http://www.lamit.fi/index.php?pid=300>

Lehto, A. & Räisänen, A. 2006. RF- ja mikroaaltotekniikka. 8. p., uud. p., Otatieto: Helsinki

Lindell, I. 2000. Radioalltojen eteneminen, 5. p., Otatieto: Helsinki

Link budget. 2009. Wikipedian artikkeli. Viitattu 9.9.2009.
http://en.wikipedia.org/wiki/Link_budget

LM2674 SIMPLE SWITCHER Power Converter High Efficiency 500 mA Step-Down Voltage Regulator. 2012. Texas instrumentsin LM2674 piirin datalehti.
www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2674.pdf

LVI RakMK-00421. 2009. D2: Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. Määräykset ja ohjeet 2010. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Helsinki.

MSP430F42x Mixed Signal Controller (Rev. A). 2007. MSP430F42x sarjan mikro-ohjainten datalehti. Viitattu 22.9.2009.
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430f427.pdf>

MSP430F42x Single-Chip Weight Scale. 2004. Sovellusohje SLAA220. Texas Instruments. Viitattu 11.9.2009.
<http://www.ti.com/general/docs/litabsmultiplefilelist.tsp?literatureNumber=slaa220>

MSP430x4xx Family User's guide. 2010. Texas instruments. Dokumentti SLAU056J.
MSP430F4xx sarjan mikro-ohjainten käyttöohje. Viitattu 11.8.2010.
<http://www.ti.com/lit/ug/slau056j/slau056j.pdf>

Muratan valmistamien passiivikelojen ja kondensaattoreiden datalehdet ja ominaisuudet tuoteperheittäin. Viitattu 10.1.2011. <http://psearch.murata.com/capacitor> ja <http://psearch.murata.com/inductor>

Qian, Xian&Fu ym. 2010. Software Architecture and Design Illuminated. Jones and Bartlett publishers Ltd: USA

Return loss. 2009. Wikipedian artikkeli. Viitattu 7.9.2009.
http://en.wikipedia.org/wiki/Return_loss

RF absorbtion in different materials, 2007, Viitattu 10.9.2012.
<http://www.devicelink.com/mddi/archive/99/12/003.html>

SFS 5512. 1992. Ilmastointi. Ilmavirtojen ja painesuhteiden mittaus ilmastointilaitoksissa. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS

Signal termination methods. 2009. Viitattu 13.1.2009.
<http://www.pericom.com/pdf/applications/AB023.pdf>

Turning off AVCC only. 2007. Keskusteluryhmä yahoo.com sivustolla. fchambers01: vastaus 28.8.2007. Viitattu 22.7.2012.
<http://tech.groups.yahoo.com/group/msp430/message/32532>

Wilson, J. 2004. Sensor Technology Handbook. Elsevier Inc: USA. ISBN: 0-7506-7729-05


LIITE 1. Saturoituneilla suolaliuoksilla luotuja suhteellisen kosteuden referenssejä.

Equilibrium Relative Humidity Saturated Salt Solutions

Relative Humidity (%RH)			
Temperature °C	Lithium Chloride	Potassium Acetate	Magnesium Chloride
0	11.23 ± 0.54		33.66 ± 0.33
5	11.26 ± 0.47		33.60 ± 0.28
10	11.29 ± 0.41	23.28 ± 0.53	33.47 ± 0.24
15	11.30 ± 0.35	23.40 ± 0.32	33.30 ± 0.21
20	11.31 ± 0.31	23.11 ± 0.25	33.07 ± 0.18
25	11.30 ± 0.27	22.51 ± 0.32	32.78 ± 0.16
30	11.28 ± 0.24	21.61 ± 0.53	32.44 ± 0.14
35	11.25 ± 0.22		32.05 ± 0.13
40	11.21 ± 0.21		31.60 ± 0.13
45	11.16 ± 0.21		31.10 ± 0.13
50	11.10 ± 0.22		30.54 ± 0.13
55	11.03 ± 0.23		29.93 ± 0.16
60	10.95 ± 0.26		29.26 ± 0.18
65	10.86 ± 0.29		28.54 ± 0.21
70	10.75 ± 0.33		27.77 ± 0.25
75	10.64 ± 0.38		26.94 ± 0.29
80	10.51 ± 0.44		26.05 ± 0.34
85	10.38 ± 0.51		25.11 ± 0.39
90	10.23 ± 0.59		24.12 ± 0.46
95	10.07 ± 0.67		23.07 ± 0.52
100	9.90 ± 0.77		21.97 ± 0.60

Saturated Salt Solutions

A very convenient method to calibrate humidity sensors is the use of saturated salt solutions. At any temperature, the concentration of a saturated solution is fixed and does not have to be determined. By providing excess solute, the solution will remain saturated even in the presence of modest moisture sources and sinks. When the solute is a solid in the pure phase, it is easy to determine that there is saturation.

The saturated salt solution, made up as a slushy mixture with distilled water and chemically pure salt, is enclosed in a sealed metal or a glass chamber. Wexler and Hasegawa measured the humidity in the atmosphere above eight saturated salt solutions for ambient temperatures 0 to 50°C using a dew-point hygrometer. Later, Greenspan compiled, from the literature, data on 28 saturated salt solutions to cover the entire range of relative humidity. Using a data base from 21 separate investigations comprising 1106 individual measurements, fits were made by the method of least squares to regular polynomial equations to obtain the "best" value of relative humidity in air as a function of temperature. These values are summarized in the table shown. 

Relative Humidity (%RH)						
Temperature °C	Potassium Carbonate	Magnesium Nitrate	Sodium Chloride	Potassium Chloride	Potassium Nitrate	Potassium Sulfate
0	43.13 ± 0.66	60.35 ± 0.55	75.51 ± 0.34	88.61 ± 0.53	96.33 ± 2.9	98.77 ± 1.1
5	43.13 ± 0.50	58.86 ± 0.43	75.65 ± 0.27	87.67 ± 0.45	96.27 ± 2.1	98.48 ± 0.91
10	43.14 ± 0.39	57.36 ± 0.33	75.67 ± 0.22	86.77 ± 0.39	95.96 ± 1.4	98.18 ± 0.76
15	43.15 ± 0.33	55.87 ± 0.27	75.61 ± 0.18	85.92 ± 0.33	95.41 ± 0.96	97.89 ± 0.63
20	43.16 ± 0.33	54.38 ± 0.23	75.47 ± 0.14	85.11 ± 0.29	94.62 ± 0.66	97.59 ± 0.53
25	43.16 ± 0.39	52.89 ± 0.22	75.29 ± 0.12	84.34 ± 0.26	93.58 ± 0.55	97.30 ± 0.45
30	43.17 ± 0.50	51.40 ± 0.24	75.09 ± 0.11	83.62 ± 0.25	92.31 ± 0.60	97.00 ± 0.40
35		49.91 ± 0.29	74.87 ± 0.12	82.95 ± 0.25	90.79 ± 0.83	96.71 ± 0.38
40		48.42 ± 0.37	74.68 ± 0.13	82.32 ± 0.25	89.03 ± 1.2	96.41 ± 0.38
45		46.93 ± 0.47	74.52 ± 0.16	81.74 ± 0.28	87.03 ± 1.8	96.12 ± 0.40
50		45.44 ± 0.60	74.43 ± 0.19	81.20 ± 0.31	84.78 ± 2.5	95.82 ± 0.45
55			74.41 ± 0.24	80.70 ± 0.35		
60			74.50 ± 0.30	80.25 ± 0.41		
65			74.71 ± 0.37	79.85 ± 0.48		
70			75.06 ± 0.45	79.49 ± 0.57		
75			75.58 ± 0.55	79.17 ± 0.66		
80			76.29 ± 0.65	78.90 ± 0.77		
85				78.68 ± 0.89		
90				78.50 ± 1.0		
95						
100						